

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Н. Э. БАУМАНА  
СТУДЕНЧЕСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО имени Н. Е. ЖУКОВСКОГО  
НАУЧНО-УЧЕБНЫЙ КОМПЛЕКС «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»



**Третья Всероссийская студенческая  
научно-техническая конференция  
«Машиностроительные технологии»**

**22 - 25 марта 2010 года**

**СБОРНИК СТАТЕЙ**

МОСКВА - 2010 г.



Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана



Научно-учебный комплекс «Машиностроительные  
технологии»



## СБОРНИК СТАТЕЙ

ТРЕТЬЕЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО–  
ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ

«СТУДЕНЧЕСКАЯ НАУЧНАЯ ВЕСНА 2010:  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

МОСКВА – 2010

## ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ!

Вы держите в руках сборник, в который вошли статьи участников третьей Всероссийской научно–технической конференции студентов «Студенческая научная весна 2010: Машиностроительные технологии».

Цель конференции – предоставить студентам возможность рассказать о самостоятельно выполненных научно–исследовательских проектах, обменяться идеями и опытом, соотнести уровень собственных разработок с работами других студентов.

Задачи конференции: накопление опыта студентами по разработке и предоставлению законченных проектов; формирование мотивации к изучению предметов специальности; информирование и обучение студентов; формирование интереса к специальности и профориентации абитуриентов; интегрирование студентов в сообщество инженеров; подтверждение уровня знаний дипломами и победами в конкурсах, что может быть использовано студентами в дальнейшем при устройстве на работу и для продолжения обучения.

Факультет «Машиностроительные технологии» один из самых старейших в МГТУ им. Н. Э. Баумана, сейчас ему более 140 лет. Он был создан в 1868 году, когда Императорское московское техническое училище получило статус высшего специального заведения и приступило к подготовке инженерах на отделениях: «Инженерно-механическом» и «Инженерно-технологическом».

Острая необходимость в таких инженерах–универсалах для России была обусловлена выдающимися фундаментальными научными открытиями и техническими изобретениями того времени, которые в истории техники названы промышленным переворотом. Его важным результатом стало возникновение отрасли машиностроения, выпускающей машины для других фабрик и заводов. Так началась подготовка квалифицированных инженеров, способных создавать технологические процессы обработки материалов, конструировать и создавать машины для промышленности.

Сегодня факультет готовит инженеров широкого профиля с фундаментальным университетским образованием и специальной профилирующей подготовкой на 12 кафедрах по металлорежущим станкам и оборудованию; инструментальной технике и технологии; технологии машиностроения; метрологии и взаимозаменяемости; литейным технологиям; технологии обработки давлением; технологии сварки и диагностики; материаловедению; оборудованию и технологии прокатки; электронным технологиям в машиностроении; лазерным технологиям в машиностроении; технологии обработки материалов.

Основатели научных школ факультета – проф. И. М. Беспрозванный, проф. А. П. Гавриленко, проф. Г. М. Головин, проф. А. И. Зимин, проф. В. М.

Кован, акад. Г. А. Николаев, проф. Н. Н. Рубцов, проф. М. А. Саверин, проф. И. И. Сидорин, проф. К. К. Хренов, акад. А. И. Целиков.

В настоящее время двенадцать профилирующих кафедр факультета готовят инженеров, бакалавров и магистров. На кафедрах факультета работают 268 преподавателей, которые обучают 2000 студентов, более 100 аспирантов, около 100 зарубежных студентов из 12 стран. Студенты проходят стажировку во Франции, Канаде, Германии, Японии.

На факультете работают более двадцати лауреатов Государственных премий и премий Правительства РФ. Учебный процесс ведут 54 профессора, доктора технических наук, 191 доцент, кандидаты наук, 23 старших преподавателя и 17 ассистентов. Среди преподавательского состава 13 действительных членов и членов корреспондентов отраслевых академий. Кафедры факультета являются ведущими в России, активно сотрудничают с университетами Германии, Франции, Великобритании, США, Канады, Китая, Японии. Исследования, проводимые учеными факультета, отражают мировые тенденции развития промышленного общества.

Всероссийская научно – техническая конференция студентов позволит дать общую оценку уровня профессиональной и научной подготовки студенчества из технических вузов России и других стран и расширить их кругозор по многим направлениям науки. Желаем успеха всем участникам конференции и ждем Вас в следующем году.

**Секция 1**  
**Металлорежущие станки и оборудование**

УДК 621.01

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫМ МОДУЛЬНЫМ РОБОТОМ УМР-3-0 И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

Карпов Алексей Александрович<sup>(1)</sup>

*Студент 3 курса<sup>(1)</sup>, кафедры МТ-1 «Металлорежущие станки»,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Вуколов А.Ю.  
ассистент кафедры РК-2 «Теория механизмов и машин»,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

### **Введение**

Одной из актуальных задач сегодняшней машиностроительной индустрии является возможность выполнения наиболее сложных и высокоточных операций при минимуме затраченных финансовых средств. А также, возможность модернизации старого имеющегося оборудования под выполнение необходимых работ, повышение его точности и функциональности. Достигнуть этого можно путём реализации эффективного взаимодействия мехатроники робота и управляющего персонального компьютера. Кроме того, при преподавании робототехнического раздела курса теории механизмов и машин студентам машиностроительных специальностей существует задача доступно продемонстрировать основные принципы робототехники на конкретных примерах, желательно – реальных устройствах. Кроме того, для повышения эффективности преподавания успевающим студентам – необходимо предоставить возможность самостоятельного создания, отладки и испытания ПО управления робототехническими устройствами. Естественным методом решения подобной задачи является использование имеющегося оборудования. Участие же в ремонте и модернизации реального устройства позволяет студенту приобрести практические навыки работы с робототехническими системами.

В данной работе за основу был взят учебный модульный робот УМР-3-0 с ограниченной функциональностью (неуправляемые по скорости двигатели степеней, с остановом путем закорачивания обмотки возбуждения), для него был разработан комплект ПО, позволивший расширить его возможности до выполнения операций повышенной сложности, и создать гибкую систему, готовую к интеграции в учебный процесс кафедры ТММ. Робот установлен в лаборатории кафедры ТММ и успешно применяется в демонстрационных целях.

### Описание конструкции робота УМР-3-0

Робот УМР-3-0 (производство МИРЭА/«Росучприбор») представляет собой конструкцию из трёх мехатронных модулей, собранную с учетом обеспечения движения в прямоугольной системе координат с рабочей зоной, совпадающей по конфигурации с зоной обслуживания. Изначально робот предназначен для исполнения операций конвейерного типа, т.е. перемещения предметов в ограниченном пространстве без препятствий внутри зоны обслуживания. Общий вид робота УМР-3-0, смонтированного на тестировочном столе, представлен на рис.1. Полное описание конструкции мехатронных модулей робота приведено в [1].

На конце модуля, обеспечивающего движение по оси Y, вместо захватывающего элемента был установлен электродвигатель с закреплённой на выходном валу фрезой.

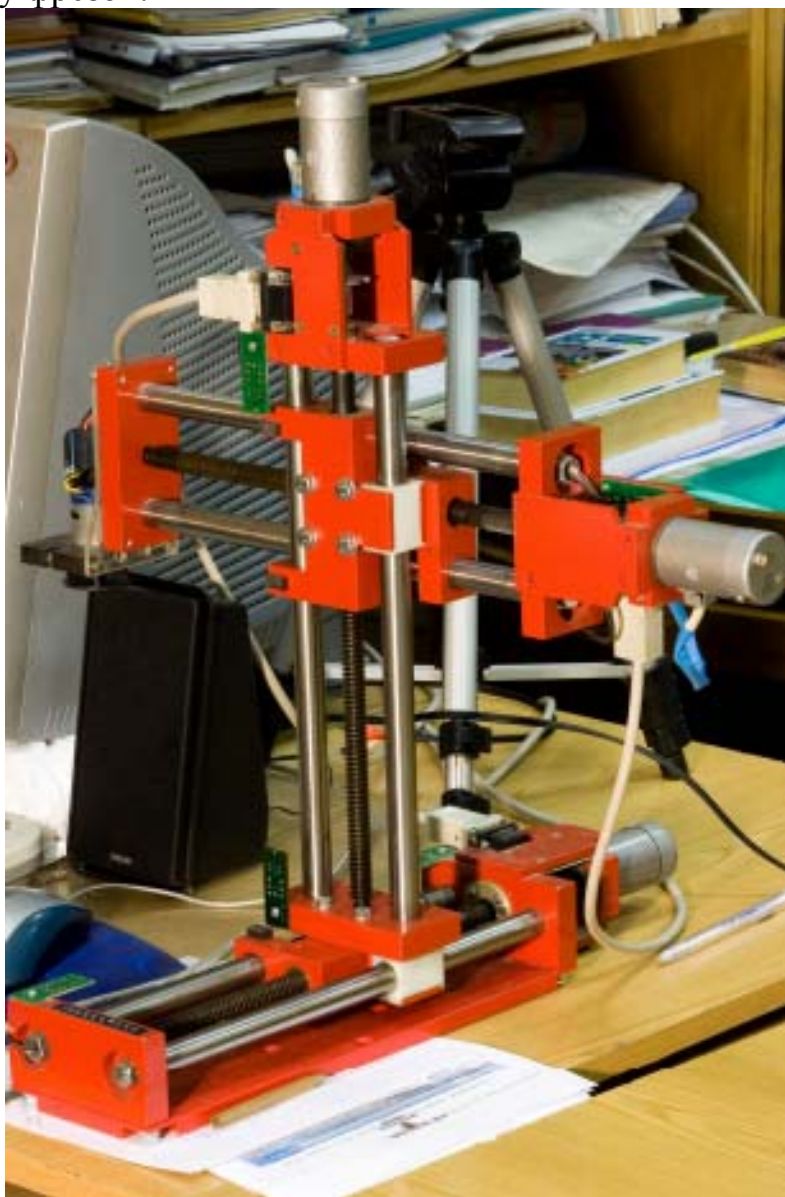


Рис. 1. Робот УМР-3-0

На каждом модуле установлено по три датчика: два из них представляют собой герконовые сигнализаторы границ рабочей зоны, и один – оптронный датчик позиционирования (рис. 2).

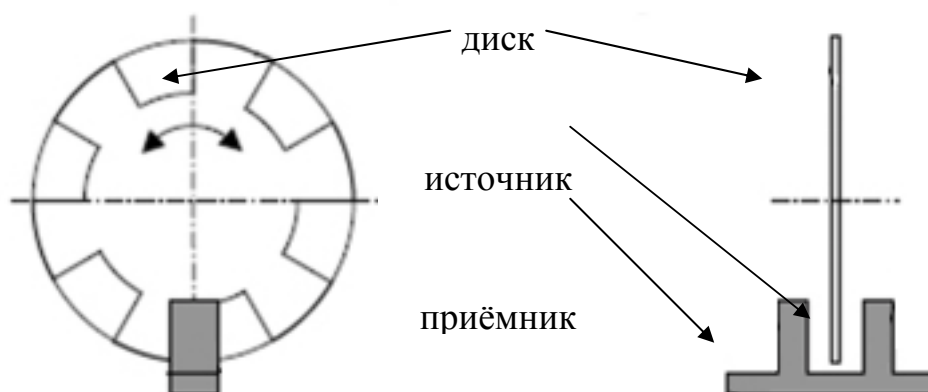


Рис. 2. Датчик позиционирования

Датчик позиционирования представляет собой круглый диск с прорезями, закреплённый на ходовом винте степени. При вращении винта диск перекрывает световой поток в оптронной паре и посылает соответствующие сигналы на блок управления, что позволяет судить о положении соответствующей степени. Частота вращения двигателей робота постоянна и не регулируется при данной конструкции блока управления. Точность позиционирования степеней составляет  $\pm 0.5$  мм по координате и  $\pm 10$  мм/с по скорости.

Итак, мы имеем малофункциональный механизм, способный перемещать фрезу внутри прямоугольной рабочей зоны, но без возможности установки её в точку пространства с необходимыми точными координатами.

Общий вид консоли блока управления роботом представлен на рис. 3. Особенности блока управления:

- Связь с управляющим компьютером по интерфейсу Centronix/LPT Bidirectional Parallel Interface;
- Эмуляция на LPT-порте системы команд микро-ЭВМ архитектуры 8255;
- Принудительный опрос датчиков без возможности реализации прямой обработки события изменения состояния порта;
- Чтение и запись данных в порте LPT по одним и тем же линиям (с изменением режима работы порта), что требует разработки специальных процедур высокоскоростного опроса датчиков;
- Наличие программируемой линейки светодиодов, служащей для необходимой пользовательской индикации режима работы системы.



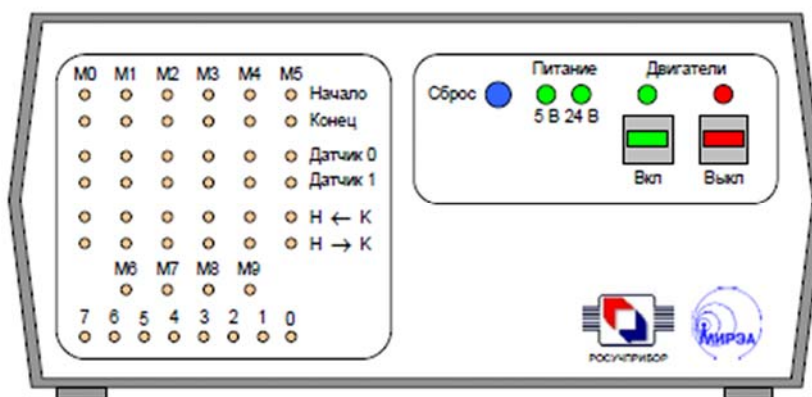


Рис. 3. Общий вид консоли блока управления роботом УМР-3-0

### Постановка задачи

Учитывая потребности использования робота УМР-3-0 в учебном процессе, возможно сформулировать задачи разработки системы управления:

1. Создать библиотеку процедур и дополнительные программные средства, позволяющие студенту самостоятельно разрабатывать и тестировать программное обеспечение для управления роботом;

2. Разработать программное обеспечение, реализующее управление роботом на низком уровне. Данное ПО должно обеспечить возможность демонстрации основных принципов мехатроники, управления робототехническими системами и взаимодействия управляющего устройства робота с компьютером. Применение – в лабораторном практикуме по курсу ТММ для студентов всех специальностей [2];

3. Создать специальное ПО, реализующее позиционирование степеней свободы робота с учетом всех особенностей конструкции, синхронизацию реальной машины с ее 3D-моделью в памяти компьютера, что позволит демонстрировать в рамках лабораторного практикума реализацию системы управления четвертого поколения [4, 5].

4. Реализовать пп. 1-3 без модернизации аппаратного обеспечения.

### Реализация библиотеки процедур и программы низкоуровневого управления

Основной особенностью стандартной библиотеки процедур, поставляемой в комплекте с блоком управления роботом является прямой доступ к портам. Подобная реализация ПО работает только под управлением операционных систем PC DOS/MS-DOS ниже 6 версии. Однако, реалии учебного процесса требуют наличия Windows-реализации библиотеки процедур с опосредованным вводом-выводом данных в LPT-порт посредством драйвера. Такая реализация была разработана в виде набора открытого исходного кода на языках C++ (разработчик – А. Вуколов) и ANSI Object Pascal/Delphi (разработчик – автор). Основой реализации послужил

свободно распространяемый WinNT-драйвер виртуального устройства прямого доступа к портам WinIO.vxd (автор Я. Каплан) [3]. Тексты библиотеки процедур доступны студентам на кафедре ТММ по запросу, что позволяет предоставить возможность самостоятельной разработки ПО для робота УМР-3-0. Все программы, составленные в рамках данной работы, используют библиотеку процедур в текущей версии.

Программа низкоуровневого управления ROBOEXEC.EXE для робота УМР-3-0 реализует прямой доступ к эмулируемым регистрам микро-ЭВМ архитектуры 8255. Общий вид главного окна программы в английском языковом варианте представлен на рис. 4.

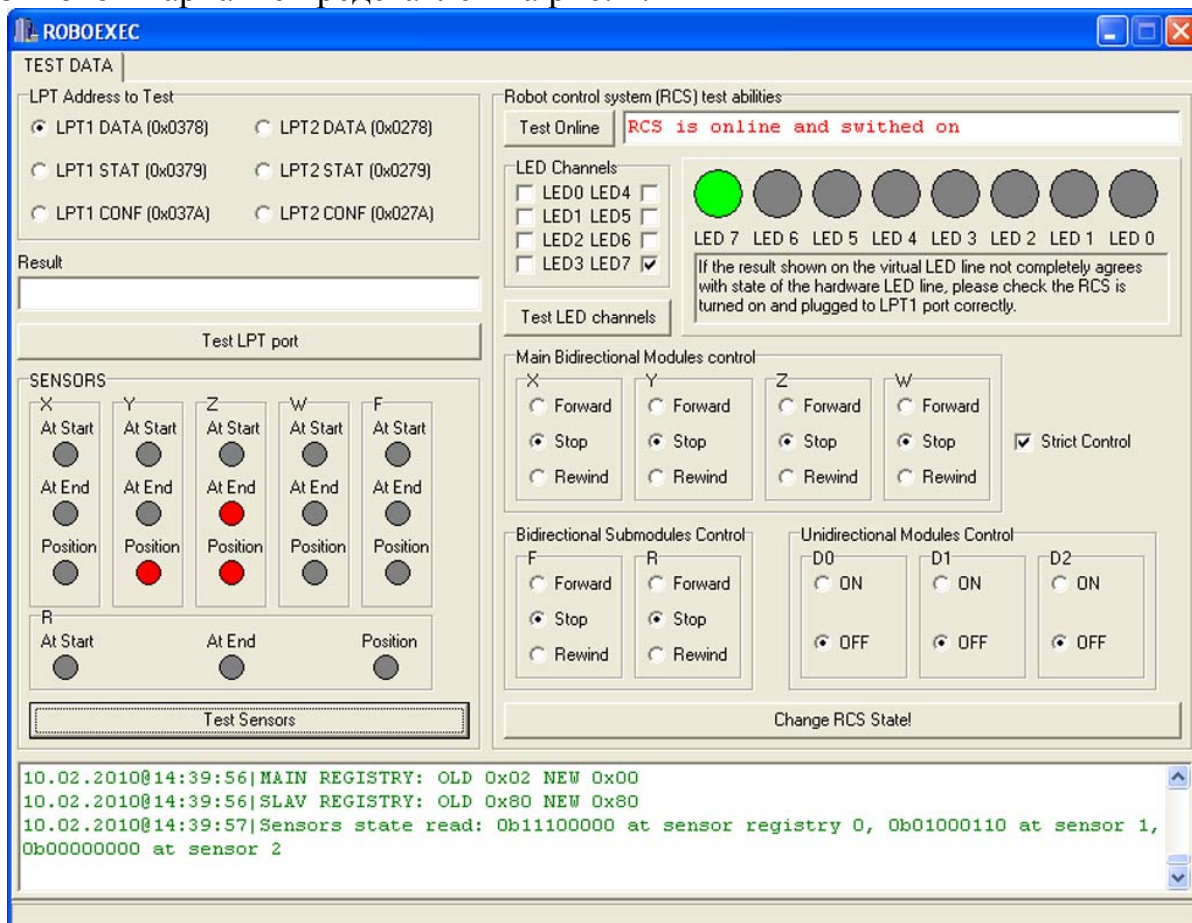


Рис. 4. Общий вид главного окна программы ROBOEXEC.EXE

Программа ROBOEXEC обеспечивает прямой доступ к регистрам блока управления роботом УМР-3-0, подключенного к порту LPT1 или LPT2. Кроме того, предусмотрена возможность подключения к портам блока управления – дополнительных степеней свободы в случае модернизации конструкции робота.

Любое изменение состояния регистров блока управления требует непосредственного воздействия пользователя на виртуальные органы управления программы. Значения, передаваемые в регистры, задаются установкой переключателей, а также протоколируются в специальном окне. Программа не является событибно-ориентированной – опрос датчиков производится однократно по команде пользователя (рис. 5).

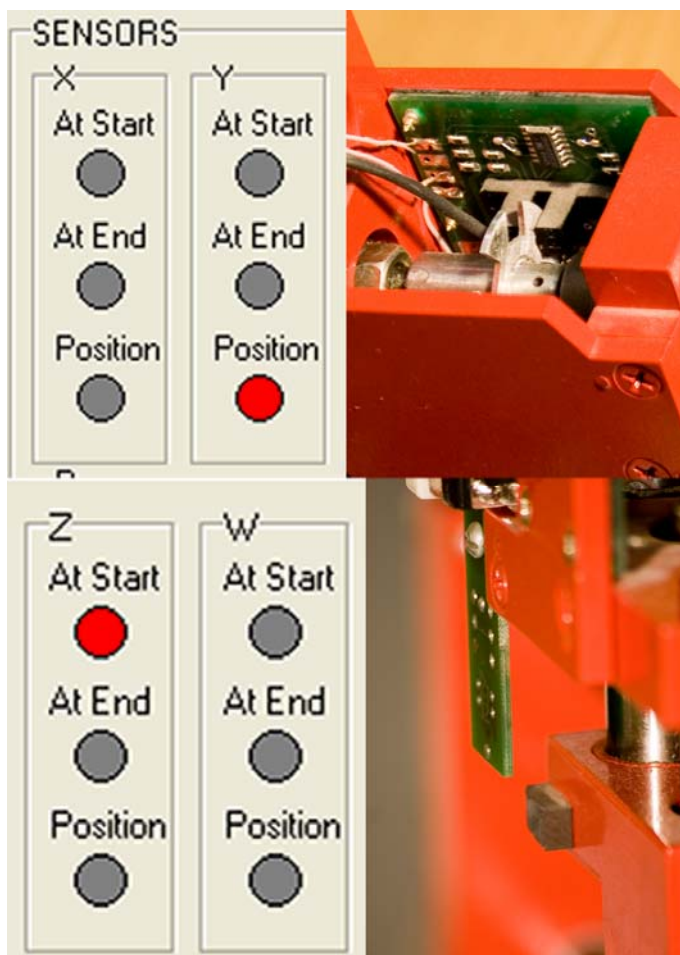


Рис. 5. Работа программы ROBOEXES.EXE с датчиками

В состоянии «ВКЛ» находятся: датчик позиционирования степени свободы по оси “Y” и датчик границы рабочей зоны степени по оси “Z”.

Особенностью ROBOEXES.EXE является возможность управления выбегом двигателей – в случае, если проводится останов одной операцией всех включенных двигателей степеней – переключатель Strict Control обеспечивает возможность такого останова без закорачивания обмотки, что открывает возможности измерения выбега степеней и его влияния на позиционирование. Программа ROBOEXES.EXE успешно применяется в лабораторном практикуме по курсу ТММ.

### **Особенности создания программы управления**

При преподавании робототехнического раздела курса ТММ важной задачей является формирование у студента объективного представления о взаимодействии между реальным робототехническим устройством и виртуальной производственной средой (или средой планирования технологических операций). С учетом данного требования была разработана программа SKAYNET.EXE, в которой реализовано взаимодействие предельно упрощенной 3D-среды планирования и реального

робототехнического устройства. Общий вид главного окна программы представлен на рис. 6.

Программа создана в среде Delphi [6] с применением свободно распространяемой графической надстройки GLScene, упрощающей работу с OpenGL в Delphi [7]. Принцип работы программы основан на одновременном исполнении (в нескольких потоковых объектах Windows) нескольких программных таймеров: часть таймеров отвечает за опрос порта LPT компьютера, к которому подключён робот (съем данных с датчиков), и за отсылку требуемых данных на линии того же порта.

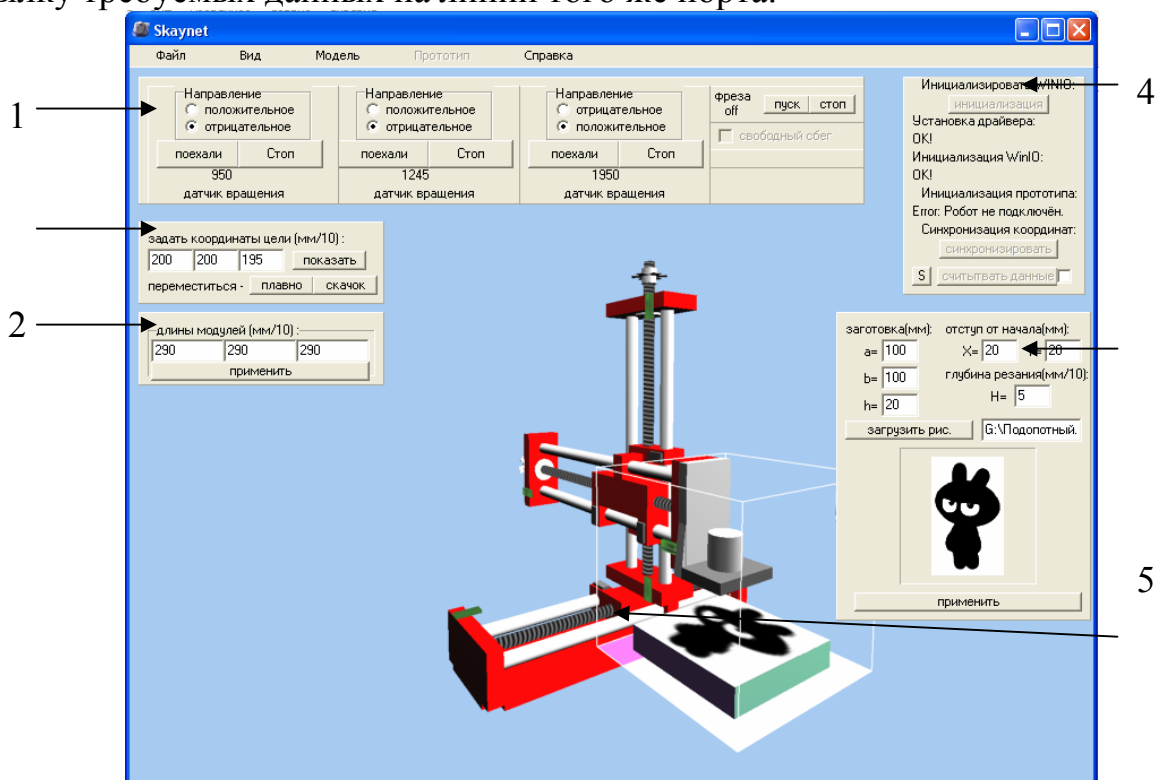


Рис. 6. Общий вид главного окна программы SKAYNET.EXE

1 – главная техническая панель, отвечающая за управление движением модулей робота; 2 – панель установки фрезы; 3 – панель изменения длин модулей для случая нестандартной комплектации робота; 4 – панель синхронизации (автоматической установки системы в начальную позицию); 5 – панель подгрузки 2D-модели изделия; 6 – 3D-модель робота.

Другие таймеры отвечают за задание входных данных аналитического расчёта движения реального робота. Один из таймеров является времязадающим элементом синхронизации анимированной 3D-модели робота, встроенной в программу для наглядности представления происходящего процесса. Кроме того, в программе реализована возможность управления роботом с клавиатуры.

Принцип взаимодействия пользователя с программой и программы с роботом можно представить в виде блок-схемы (рис. 7). Исполнение программы изначально распараллелено по трем потокам: главный поток VCL (объектно-ориентированная реализация управления окнами и потоками Windows в среде Delphi/C++ Builder) отвечает за аналитический расчёт

положения модулей робота и выполнения необходимых операций по изменению их положения; второй поток – за рендеринг 3D изображений; третий поток включает функциональность опроса LPT порта и отсылку на него данных. Движение каждого модуля закреплено за соответствующим программным таймером, запускающимся при начале движения модуля и выключающимся при завершении движения модуля. Для повышения точности позиционирования и увеличения частоты переключения порта вместо стандартного таймера Windows применена реализация таймера WinNT – MCI Timing Engine/DirectX, что позволяет потенциально получить частоту опроса датчиков в текущей реализации библиотеки процедур до 120-150 Гц.

Данные, введённые пользователем в программу, обрабатываются главным потоком VCL, откуда часть соответствующей информации передаётся в поток, отвечающий за прорисовку 3D модели, выводимый на экран; а часть в поток, отвечающий за генерацию и передачу сигнала через LPT порт на блок управления робота в виде байт. Блок управления на основе полученных данных координирует работу двигателей робота. Датчики движения и позиционирования при срабатывании передают сигналы в блок управления, которые, в свою очередь, считываются с LPT-порта по сигналу ещё одного таймера.

Для подтверждения достижения заданной точности позиционирования проводился эксперимент (рис. 8). По полученным результатам можно сделать вывод о том, что погрешность позиционирования рабочего органа робота при текущей реализации системы управления не превышает 1 мм.

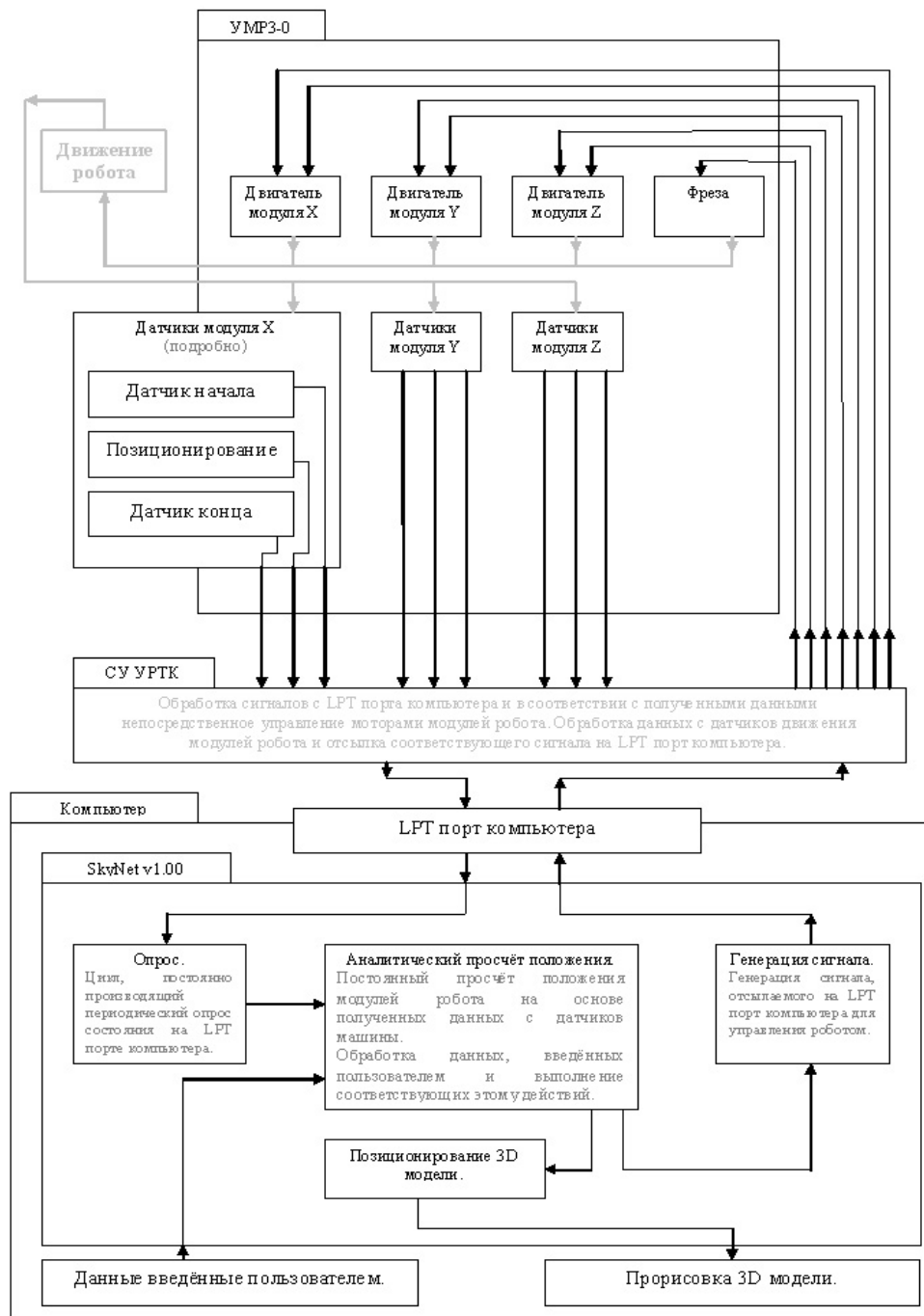


Рис. 7. Блок-схема программно-аппаратного комплекса SKAYNET.EXE + УМР-3-0

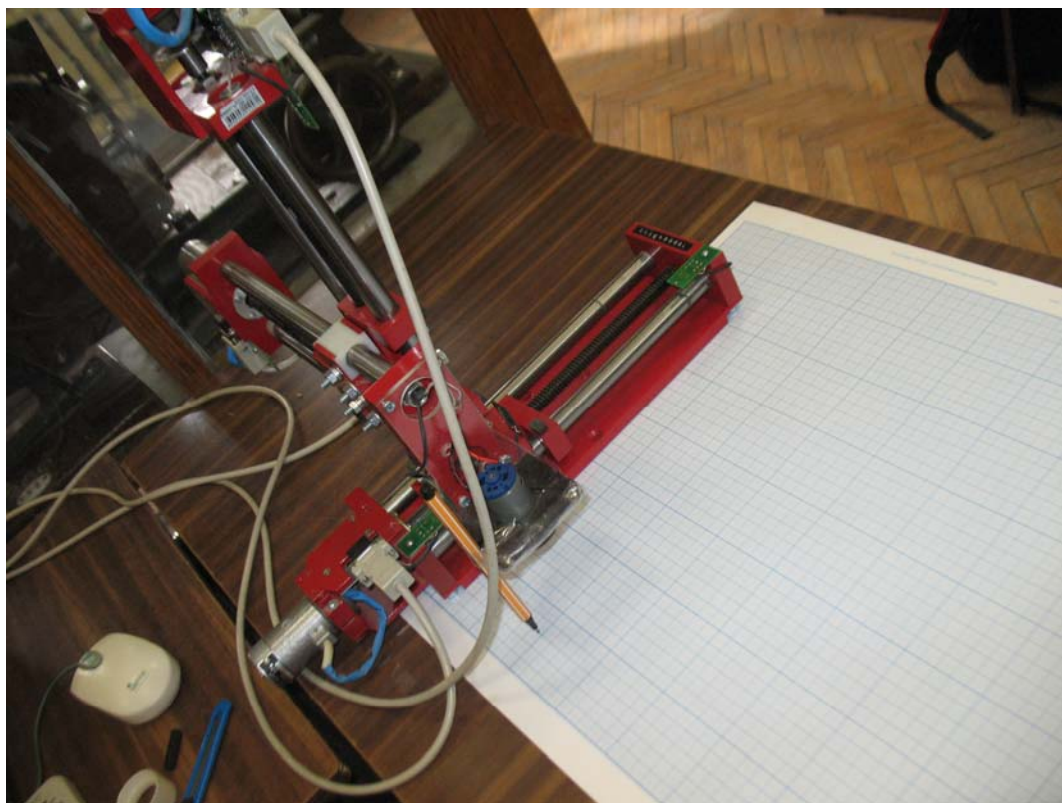


Рис. 8. Эксперимент по проверке точности позиционирования

### Заключение

При подготовке данной работы успешно решена задача создания библиотеки процедур управления, обеспечивающей программирование робота УМР-3-0 на языках С++ и ANSI Object Pascal под управлением Windows.

Разработан комплект программного обеспечения, позволяющий наглядно продемонстрировать низкоуровневое (ROBOEXEC.EXE) управление роботом, и реализацию системы управления четвертого поколения с виртуальной средой планирования технологической операции (SKAYNET.EXE).

Внедрение робота УМР-3-0 в связке с программами ROBOEXEC/SKAYNET в учебный процесс (лабораторный практикум) по курсу теории механизмов позволяет существенно повысить эффективность преподавания робототехнического раздела курса. Студенты хорошо воспринимают наглядно демонстрируемые на реальном примере основные принципы робототехники. Дополнительно, успевающим студентам предоставляется возможность самостоятельно реализовывать и проверять авторские алгоритмы управления реальной робототехнической системой. На данный момент учебная робототехническая система установлена в лаборатории кафедры ТММ, оснащена управляющим компьютером и успешно используется в учебном процессе.

## Литература

1. Учебные модульные роботы: техническое описание. Росучприбор, 2002 (электронный ресурс)  
<http://www.rosuchpribor.ru/russian/Prof2007/robot/umr-2m.html>
2. Тарабарин В.Б., Кузенков В.В., Фурсяк Ф.И. Лабораторный практикум по теории механизмов и машин. М., МГТУ, 2009
3. WinIO.sys help and user guide for Object Pascal and C++ Builder users (2006). Open source. Available from Yariv Kaplan (электронный ресурс)  
[http://www.internals.com/utilities\\_main.htm](http://www.internals.com/utilities_main.htm)
4. A. Golovin, M. Ceccarelli: Usage of real mechanisms and models in Machines and Mechanisms Theory course trainings: the album of illustrations. Registration Cert. №16335, 21.05.2009/State registration cert. №0320900972
5. A. Golovin, D. Saschenko: Expert Judgment of Mechanical parts of Robotics. Edited by S. Jatsun. Vibration Machines and technology: Proceedings of Scientific and Technical Conference. – Kursk (2008). Pp. 834-841.
6. Фленов М.Е. Библия Delphi. ISBN 978-5-9775-0116-3. С-Пб., «БХВ-Петербург», 2008.
7. Ru.Wikipedia.org: GLScene. Published under GNU Public License (электронный ресурс)  
<http://ru.wikipedia.org/wiki/GLScene>



УДК 621.3.049.77

## РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Куренков Виктор Александрович

*Студент 6 курса, студент 6 курса*

*Кафедра «Металлорежущие станки и комплексы»*

*Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Ю.В. Никулин,*

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и комплексы»*

В данной статье рассматривается устройство привода шагового двигателя для разрабатываемой системы числового программного управления станками, созданное в МГТУ им. Н.Э.Баумана студентами Дюковым М.А. и Куренковым В.А. Основу привода составляют программируемые микроконтроллеры. Для изучения поведения двигателя на разных скоростях вращения и отладки системы была разработана программа, позволяющая включать и выключать двигатель, а также менять направление и скорость вращения.



Рис.1. Схема подключения привода к ЭВМ

Интерфейс тестовой программы представлен на рис. 4. Программа позволяет менять направление вращения двигателя, а также управлять скоростью его вращения.

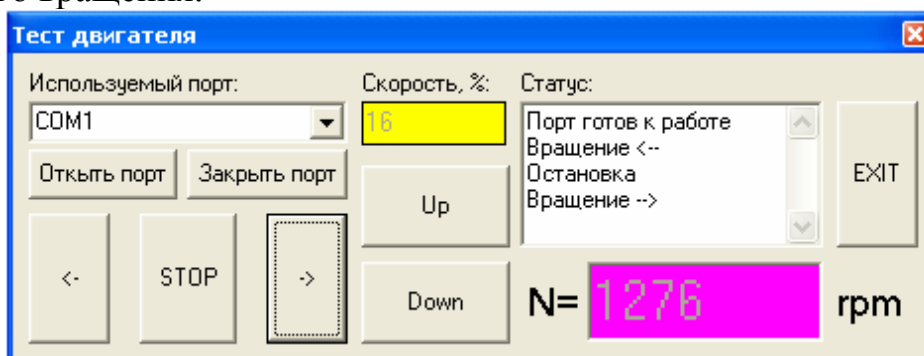


Рис.2. Тестовая программа управления электродвигателем

В настоящее время уже разработан привод на основе шагового двигателя. Схема подключения его к ЭВМ изображена на рис.3. Итак, подробнее:

Шаговые двигатели названы так, потому что принцип работы их отличается от двигателей, вращающихся с постоянной скоростью при подаче питания. ШД отработывает шаг (поворачиваются на определенный угол) в соответствии с импульсом, поданным на определенную обмотку. Т.е., если мы подадим серию импульсов от системы управления, то двигатель повернется именно на такое количество углов шага и остановится. Такие двигатели не нуждаются в обратной связи для их управления, что сильно снижает стоимость приводов на ШД. Здесь не применяются дорогостоящие устройства слежения за перемещением, такие как оптические энкодеры. Недостатком ШД является их слабая мощность при достаточно больших габаритах. Для дешевых приводов небольшой мощности и динамичности ШД- идеальное решение.

В разработанном приводе применяется двигатель ШД-5Д1, он имеет функциональную конструкцию на основе переменного магнитного сопротивления ротора.

Ротор состоит из магнитопроводящего металла и по форме напоминает зубчатое колесо. При появлении магнитного поля в одной из обмоток статора, ротор стремится замкнуть магнитный контур, т.е. повернуться «зубцами» вдоль линии магнитного поля. В этом и состоит принцип уменьшения магнитного сопротивления. Недостатком является меньшая мощность, чем в первом случае, но зато лучшие динамические свойства. Т.к. здесь нет взаимного влияния полюсов ротора.

Такие привода можно использовать в станках малой и средней мощности. Электродвигатель ШД-5Д1 имеет шесть обмоток, ток в которых должен коммутироваться последовательно согласно режиму шага или полушага. Эта задача полностью лежит на микроконтроллере Mega162. За каждый шаг двигатель отработывает 1,5 градуса поворота ротора.

Есть одна особенность управления этим приводом. Дело в том, что ток в обмотках зависит от частоты вращения двигателя. Кроме того при коммутации сигнала отработки шага, зависимость тока в обмотке от времени имеет не прямоугольную форму, а некий всплеск с затухающим процессом. В момент всплеска ток в обмотках превышает допустимые значения в несколько раз, а в момент затухающего процесса возможен пропуск шага. Для того, чтобы решить эту проблему была предусмотрена обратная связь по току. Она позволяет поддерживать нормальный режим работы двигателя при всех частотах вращения. Ограничение тока в данной схеме осуществляется с помощью ШИМ.

В силовой части нашего привода применены мощные полевые транзисторы. Это позволило существенно уменьшить энергетические потери, так как нам в данном случае нет необходимости применять токоограничивающие резисторы.

Последовательность включения обмоток двигателя выполнена согласно полшаговому режиму работы.

Схема блока управления ШД представлена ниже:

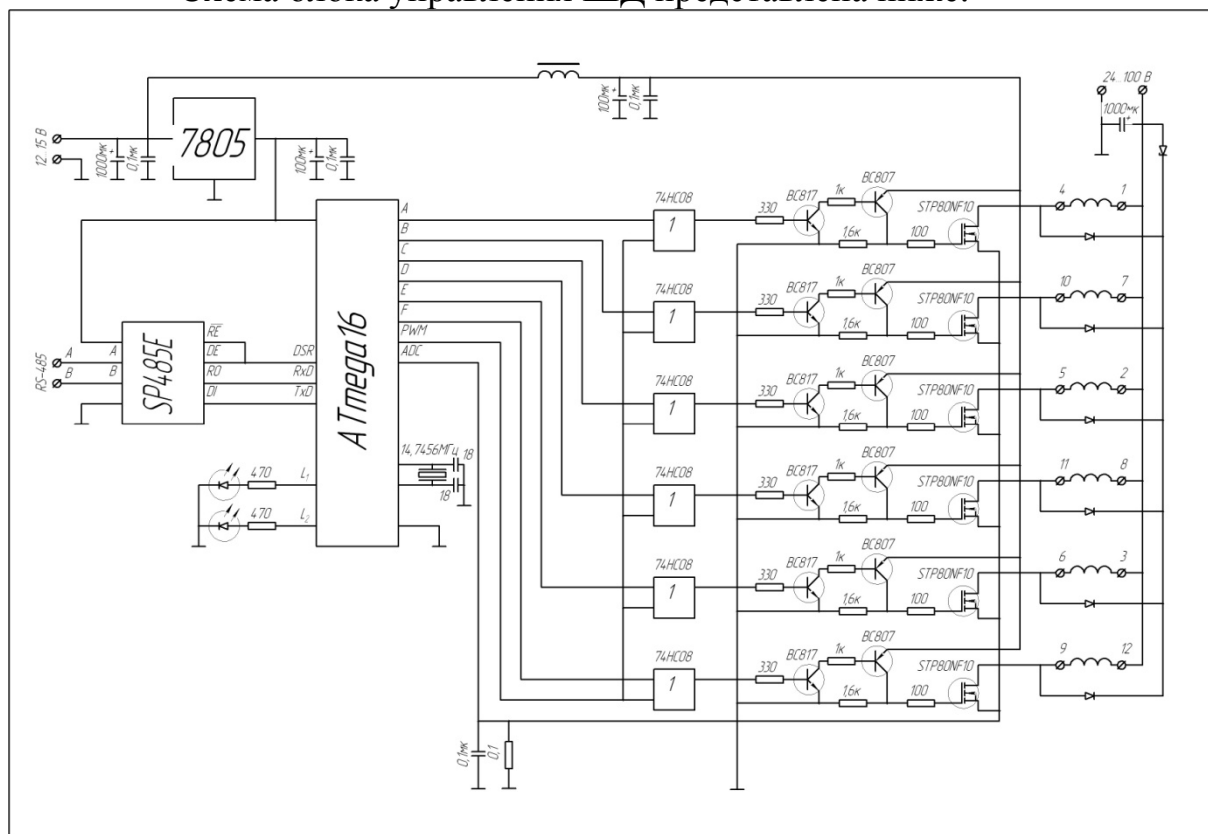


Рис.3. Электрическая схема управления приводом

На схеме мы видим, что управляющее воздействие передается на контроллер mega16 через блок SP485E, который преобразует уровень сигнала из стандарта RS-485 в логический сигнал USART, воспринимаемый данным микроконтроллером. Ниже этого блока видны светодиоды индикации включения и передачи данных. Блок 7805 – это стабилизатор напряжения 5В. Микросхема 74PC08 служит для реализации 6-ти каналов ШИМ с помощью одного. Это элемент «И», который задает скважность сигнала в каждой обмотке одновременно. Транзисторные ключи STP80NF10 являются силовыми. Это полевые транзисторы с высокой скоростью срабатывания. Их всегда можно нарастить до необходимой мощности. Остальные транзисторы относятся к схеме управления силовыми ключами –это драйвера. В правой части схемы изображены обмотки ШД.

При его разработке использовались SMD компоненты, поэтому он ничуть не уступает по низким габаритным размерам промышленным системам управления.

Момент, создаваемый шаговым двигателем, зависит от нескольких факторов:

- скорости
- тока в обмотках
- схемы драйвера

На рис. 4а показана зависимость момента от угла поворота ротора.

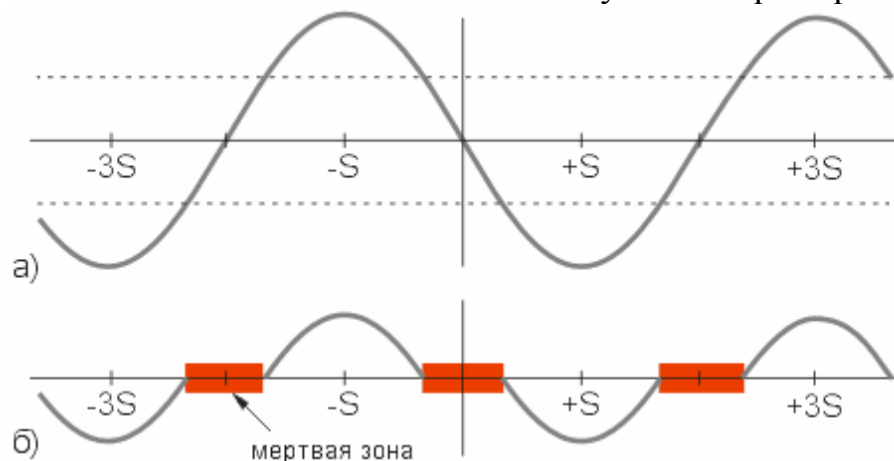


Рис. 4. Возникновение мертвых зон в результате действия трения

У идеального шагового двигателя эта зависимость синусоидальная. Точки  $S$  являются положениями равновесия ротора для негруженого двигателя и соответствуют нескольким последовательным шагам. Если к валу двигателя приложить внешний момент, меньший момента удержания, то угловое положение ротора изменится на некоторый угол  $\Phi$ .

$$\Phi = (N/(2*\pi)) * \sin(T_a/T_h),$$

где  $\Phi$  – угловое смещение,

$N$  – количество шагов двигателя на оборот,

$T_a$  – внешний приложенный момент,

$T_h$  – момент удержания.

Угловое смещение  $\Phi$  является ошибкой позиционирования нагруженного двигателя. Если к валу двигателя приложить момент, превышающий момент удержания, то под действием этого момента вал провернется. В таком режиме положение ротора является неконтролируемым.

На практике всегда имеется приложенный к двигателю внешний момент, хотя бы потому, что двигателю приходится преодолевать трение. Силы трения могут быть разделены на две категории: статическое трение или трение покоя, для преодоления которого требуется постоянный момент и динамическое трение или вязкое трение, которое зависит от скорости. Рассмотрим статическое трение. Предположим, что для его преодоления требуется момент в половину от пикового. На рис. 4а штриховыми линиями показан момент трения. Таким образом, для вращения ротора остается только момент, лежащий на графике за пределами штриховых линий. Отсюда следуют два вывода: трение снижает момент на валу двигателя и появляются мертвые зоны вокруг каждого положения равновесия ротора (рис. 4б):

$$d = 2 ( S / (\pi/2) ) \arcsin(T_f/T_h) = ( S / (\pi/4) ) \arcsin(T_f/T_h),$$

где  $d$  – ширина мертвой зоны;

$S$  – угол шага;

$T_f$  – момент трения;

$T_h$  – момент удержания.

Мертвые зоны ограничивают точность позиционирования. Например, наличие статического трения в половину от пикового момента двигателя с шагом 90 град. вызовет наличие мертвых зон в 60 град. Это означает, что шаг двигателя может колебаться от 30 до 150 град., в зависимости от того, в какой точке мертвой зоны остановится ротор после очередного шага.

Наличие мертвых зон является очень важным для микрошагового режима. Если, например, имеются мертвые зоны величиной  $d$ , то микрошаг величиной менее  $d$  вообще не сдвинет ротор с места. Поэтому для систем с использованием микрошагов очень важно минимизировать трение покоя.

Когда двигатель работает под нагрузкой, всегда существует некоторый сдвиг между угловым положением ротора и ориентацией магнитного поля статора. Особенно неблагоприятной является ситуация, когда двигатель начинает торможение и момент нагрузки реверсируется. Нужно отметить, что запаздывание или опережение относится только к положению, но не к скорости. В любом случае, если синхронность работы двигателя не потеряна, это запаздывание или опережение не может превышать величины двух полных шагов.

Каждый раз, когда шаговый двигатель осуществляет шаг, ротор поворачивается на  $S$  радиан. При этом минимальный момент имеет в месте, когда ротор находится ровно между соседними положениями равновесия (рис. 5).

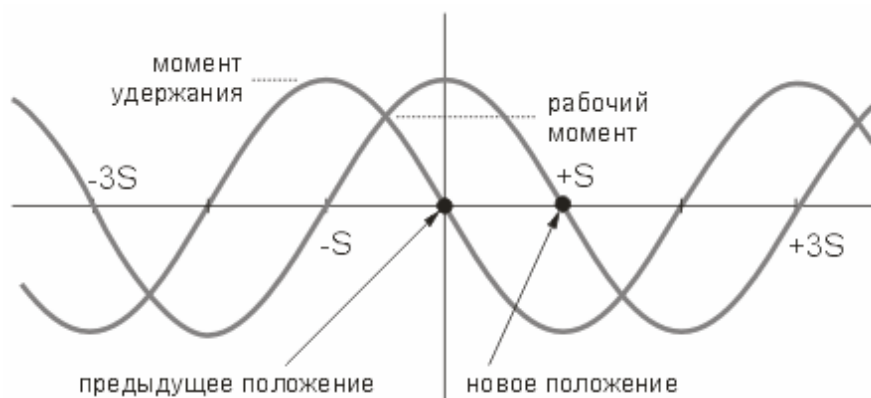


Рис. 5. Момент удержания и рабочий момент шагового двигателя

Этот момент называют рабочим моментом, он означает, какой наибольший момент может преодолеть двигатель при вращении с малой скоростью. При синусоидальной зависимости момента от угла поворота ротора, этот момент  $T_r = T_h/(20.5)$ . Если двигатель делает шаг с двумя запитанными обмотками, то рабочий момент равен моменту удержания для одной запитанной обмотки.

Параметры привода на основе шагового двигателя сильно зависят от характеристик нагрузки. Кроме трения, реальная нагрузка обладает инерцией. Инерция препятствует изменению скорости. Инерционная нагрузка требует от двигателя больших моментов на разгоне и торможении, ограничивая таким образом максимальное ускорение. С другой стороны, увеличение инерционности нагрузки увеличивает стабильность скорости.

Такой параметр шагового двигателя, как зависимость момента от скорости является важнейшим при выборе типа двигателя, выборе метода управления фазами и выборе схемы драйвера. При конструировании высокоскоростных драйверов шаговых двигателей нужно учитывать, что обмотки двигателя представляют собой индуктивность. Эта индуктивность определяет время нарастания и спада тока. Поэтому если к обмотке приложено напряжение прямоугольной формы, форма тока не будет прямоугольной. При низких скоростях (рис. 6а) время нарастания и спада тока не способно сильно повлиять на момент, однако на высоких скоростях момент падает. Связано это с тем, что на высоких скоростях ток в обмотках двигателя не успевает достигнуть номинального значения (рис. 6б).

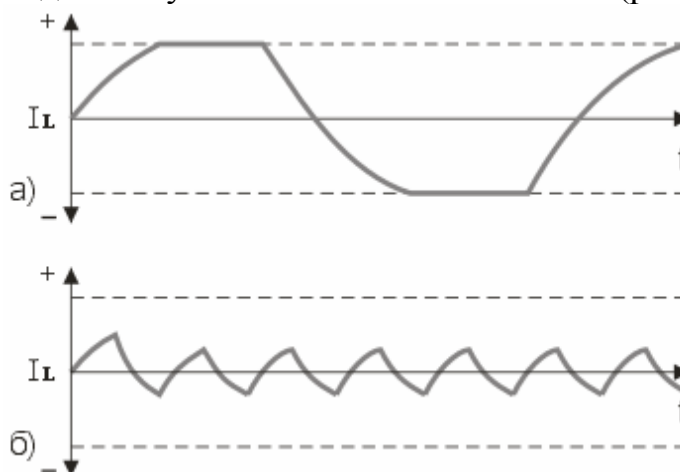


Рис. 6. Форма тока в обмотках двигателя на разных скоростях работы

Для того, чтобы момент падал как можно меньше, необходимо обеспечить высокую скорость нарастания тока в обмотках двигателя, что достигается применением специальных схем для их питания.

Поведение момента при увеличении частоты коммутации фаз примерно таково: начиная с некоторой частоты среза момент монотонно падает. Обычно для шагового двигателя приводятся две кривые зависимости момента от скорости (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость момента от скорости

Внутренняя кривая показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен тронуться. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой старта или частотой приемистости. Она определяет максимальную скорость, на которой ненагруженный двигатель может тронуться. На практике эта величина лежит в пределах 200 – 500 полных шагов в секунду. Инерционность нагрузки сильно влияет на вид внутренней кривой. Большая инерционность соответствует меньшей области под кривой. Эта область называется областью старта. Внешняя кривая показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен поддерживать вращение без пропуска шагов. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой разгона. Она показывает максимальную скорость для данного двигателя без нагрузки. При измерении максимальной скорости нужно иметь в виду, что из-за явления резонанса момент равен нулю еще и на резонансной частоте. Область, которая лежит между кривыми, называется областью разгона.

Шаговым двигателям свойственен нежелательный эффект, называемый резонансом. Эффект проявляется в виде внезапного падения момента на некоторых скоростях. Это может привести к пропуску шагов и потере синхронности. Эффект проявляется в том случае, если частота шагов совпадает с собственной резонансной частотой ротора двигателя.

Когда двигатель совершает шаг, ротор не сразу устанавливается в новую позицию, а совершает затухающие колебания. Дело в том, что систему ротор – магнитное поле – статор можно рассматривать как пружинный маятник, частота колебаний которого зависит от момента инерции ротора (плюс нагрузки) и величины магнитного поля. Ввиду сложной конфигурации магнитного поля, резонансная частота ротора зависит от амплитуды колебаний. При уменьшении амплитуды частота растет, приближаясь к малоамплитудной частоте, которая более просто вычисляется количественно. Эта частота зависит от угла шага и от отношения момента удержания к моменту инерции ротора. Большой момент удержания и меньший момент инерции приводят к увеличению резонансной частоты.

Резонансная частота вычисляется по формуле:

$$F_0 = (N * T_H / (J_R + J_L)) * 0.5 / 4 * \pi,$$

где  $F_0$  – резонансная частота,

$N$  – число полных шагов на оборот,

$T_H$  – момент удержания для используемого способа управления и тока фаз,

$J_R$  – момент инерции ротора,

$J_L$  – момент инерции нагрузки.

Необходимо заметить, что резонансную частоту определяет момент инерции собственно ротора двигателя плюс момент инерции нагрузки, подключенной к валу двигателя. Поэтому резонансная частота ротора ненагруженного двигателя, которая иногда приводится среди параметров,

имеет маленькую практическую ценность, так как любая нагрузка, подсоединенная к двигателю, изменит эту частоту.

На практике эффект резонанса приводит к трудностям при работе на частоте, близкой к резонансной. Момент на частоте резонанса равен нулю и без принятия специальных мер шаговый двигатель не может при разгоне пройти резонансную частоту. В любом случае, явление резонанса способно существенно ухудшить точностные характеристики привода.

В системах с низким демпфированием существует опасность потери шагов или повышения шума, когда двигатель работает вблизи резонансной частоты. В некоторых случаях проблемы могут возникать и на гармониках частоты основного резонанса.

Когда используется не микрошаговый режим, основной причиной появления колебаний является прерывистое вращение ротора. При осуществлении шага ротору толчком сообщается некоторая энергия. Этот толчок возбуждает колебания. Энергия, которая сообщается ротору в полушаговом режиме, составляет около 30% от энергии полного шага. Поэтому в полушаговом режиме амплитуда колебаний существенно меньше. В микрошаговом режиме с шагом  $1/32$  основного при каждом микрошаге сообщается всего около 0.1% от энергии полного шага. Поэтому в микрошаговом режиме явление резонанса практически незаметно.

Для борьбы с резонансом можно использовать различные методы. Например, применение эластичных материалов при выполнении механических муфт связи с нагрузкой. Эластичный материал способствует поглощению энергии в резонансной системе, что приводит к затуханию паразитных колебаний. Другим способом является применение вязкого трения. Выпускаются специальные демпферы, где внутри полого цилиндра, заполненного вязкой кремнийорганической смазкой, может вращаться металлический диск. При вращении этой системы с ускорением диск испытывает вязкое трение, что эффективно демпфирует систему.

Существуют электрические методы борьбы с резонансом. Колеблющийся ротор приводит к возникновению в обмотках статора ЭДС. Если замкнуть обмотки, которые на данном шаге не используются, это приведет к демпфированию резонанса.

И, наконец, существуют методы борьбы с резонансом на уровне алгоритма работы драйвера. Например, можно использовать тот факт, что при работе с двумя включенными фазами резонансная частота примерно на 20% выше, чем с одной включенной фазой. Если резонансная частота точно известна, то ее можно проходить, меняя режим работы.

Если это возможно, при старте и остановке нужно использовать частоты выше резонансной. Увеличение момента инерции системы ротор-нагрузка уменьшает резонансную частоту.

Однако, самой эффективной мерой для борьбы с резонансом является применение микрошагового режима.



Дальнейшие исследования нацелены на применение микрошагового управления, что позволит сделать работу двигателя более плавной. Кроме того, при применении микрошага, практически исчезнет та грань минимального угла поворота, который может отработать двигатель, т.е. мы сможем повернуть ротор практически на любой малый угол.

Остаются открытыми вопросы по исследованию переходных процессов при коммутации сигналов, совершенствованию обратной связи по току и адаптируемости СУ под любой шаговый двигатель.

Процессы, происходящие при ШИМ-стабилизации тока, показаны на рис. 8. Особо следует отметить, что ток в датчике тока имеет прерывистый характер даже в том случае, если ток обмотки не прерывается. Это связано тем, что во время спада тока его путь не проходит через датчик тока (а проходит через диод).

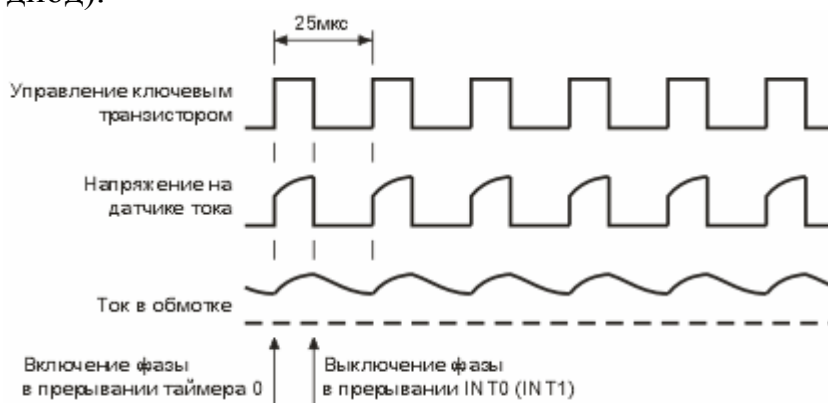


Рис. 8. Процесс ШИМ-стабилизации тока

Нужно сказать, что аналоговая часть системы ШИМ-стабилизации тока фаз двигателя является довольно «капризной». Дело в том, что сигнал, снимаемый с датчика тока, содержит большое количество помех. Помехи возникают в основном в моменты коммутации обмоток двигателя, причем как «своей», так и «чужой» фазы. Для правильной работы схемы требуется корректная разводка печатной платы, особенно это касается земляных проводников. Возможно, придется подобрать номиналы ФНЧ на входе компаратора или даже ввести в компаратор небольшой гистерезис. Как уже отмечалось выше, при управлении маломощными двигателями от ШИМ-стабилизации тока можно вовсе отказаться, применив обычную L/R-схему питания обмоток.

При выполнении этой работы преследовались цели детального изучения систем управления приводами, попытка создать гибкую СУ, которая могла бы адаптироваться под любой ШД. Это позволит управлять двигателем так, чтобы он всегда находился в оптимальных режимах работы.

УДК 621.9.06

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАСЧЕТУ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЛОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ

Ломов Михаил Викторович

*Студент 6-го курса, гр. МТ1-Д2, кафедра “Металлорежущие станки”,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: П.М. Чернянский,  
д.т.н., профессор кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э.  
Баумана.*

Физически обоснованный, проектный расчет шпиндельных узлов стал возможен с одновременным учетом жесткости шпинделя и его опор. Инженер Попович Б.Г. в 1956 г. приводит расчетные схемы двухопорных шпиндельных узлов, в которых отдельно учитываются деформации шпинделя и подшипников качения. При этом уравнения смещения переднего конца шпинделя были приведены в общем виде.

Одновременно Б. Хвала [1] опубликовал развернутый расчет прогиба переднего конца шпинделя как статически определимой задачи, решаемой для двухопорного шпинделя, в котором так же учитывались собственная деформация шпинделя и жесткость подшипников качения. В дальнейшем этот использовался проф. Ачерканом А.С. в опубликованном конспекте лекций, Фигатнером А.М. и другими отечественными и зарубежными специалистами [30,42,33,15,16].

В 1969 г. проф. Чернянский П.М. предложил принципиально новый метод расчета шпиндельных узлов, в том числе прогиба  $y$  и угла наклона  $\theta$  оси шпинделя [2]. В основу расчета положено дифференциальное уравнение упругой линии балки, лежащей на упругом основании.

$$Ely(z) = p(z), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода материала шпинделя;  $I$  – момент инерции сечения относительно оси  $x$ ;  $y$  – смещение оси шпинделя по длине  $z$ ,  $p(z)$  – функция, вид которой зависит от внешней нагрузки.

Применительно к шпиндельным узлам, рис.1, решение дифференциального уравнения (1) содержит только два постоянных коэффициента, которые определяются исходя из граничных условий над опорами.

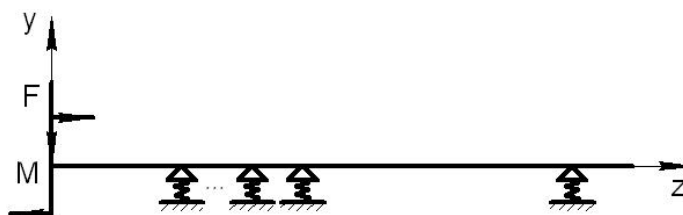


Рис. 1. Расчетная схема шпиндельного узла с несколькими подшипниками в опоре

$$\begin{aligned} EIy(z) &= A_0 + A_1 + \Phi(z) \\ EI\theta(z) &= A_1 + \frac{d\Phi(z)}{dz} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Phi(z)$  – частное решение уравнения (1), которое зависит от характера приложенной внешней нагрузки.

Предложенный метод расчета универсален, и ранее полученные зависимости являются его частным случаем. Он впервые делает возможным расчет шпиндельных узлов (валов) с любым числом подшипников в опорах и позволяет определить: оптимальное расстояние между подшипниками шпинделя, оптимальное число подшипников в опорах, жесткость шпиндельных узлов, нагрузку на каждый подшипник в опорах, прогиб и угол наклона оси шпинделя в любом его сечении. Так же с помощью данного метода возможно оценить необходимость использования простановочных колец и уточнить расчетную схему при использовании двухрядных цилиндрических подшипников в опорах и жестком креплении шкивов на шпинделе для многоопорных шпиндельных узлов.

Метод расчета прошел экспериментальную проверку [3]. Если точно известна жесткость опор-подшипников, то расчетные и экспериментальные результаты исследования практически совпадают. При этом выполняется расчет с учетом нелинейной жесткости опор.

Рассмотрим существующие методы расчета шпиндельных узлов. Для удобства изложения запишем уравнение прогиба  $y_{11}$  переднего конца двухопорного шпинделя от силы  $F$ , приложенной в той же точке, полученное с помощью предлагаемого метода.

$$y_{11} = F \left[ \frac{1}{k_1} \left( \frac{a+b}{a} \right)^2 + \frac{1}{k_2} \left( \frac{b}{a} \right)^2 + \frac{b^3}{3 \cdot E \cdot I_b} + \frac{a \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot I_a} \right] \quad (3)$$

В технической литературе по деталям машин преобладает расчет валов как балок на жестких опорах, при этом прогиб переднего конца оценивается как:

$$y_{11} = F \left[ \frac{b^3}{3 \cdot E \cdot I_b} + \frac{a \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot I_a} \right] \quad (4)$$

В литературе по металлорежущим станкам так же встречаются рекомендации, по которым опоры шпинделя рассматриваются как абсолютно жесткие. Так например при «одном роликоподшипнике или двух

подшипниках» в передней опоре шпинделя расчетная схема рекомендуется в виде жесткой заделки, и прогиб определяется только деформацией вылета шпинделя:

$$y_{11} = F \frac{b^3}{3 \cdot E \cdot I_b} \quad (5)$$

Для шпинделей металлорежущих станков подобный подход не приемлем и дает результаты, которые далеко не соответствуют действительной картине деформаций. Так как в упругом смещении шпинделя могут преобладать как деформации вала, так и деформации опор. Даже при установке двух и более подшипников в передней опоре их деформация всегда существенно скажется на смещении переднего конца шпинделя. Всегда, когда нас интересует точность, недопустимо использовать такие понятия как «жесткая опора» или «жесткая заделка» независимо от использования опор качения или скольжения в широком смысле этих понятий. Это строго доказано в теории силовых смещений.

Обширные и глубокие исследования шпиндельных узлов и подшипников качения для них выполнены фирмами SKF и FAG. В своих публикациях они приводят результаты исследования двухопорных и многоопорных шпиндельных узлов разных компоновок.

Фирма SKF приводит уравнения, по которым может быть выполнен расчет прогиба и угла наклона оси двухопорного шпинделя на упругих опорах [4].

$$\delta = \frac{F \cdot b - M}{3 \cdot E} \cdot \left[ \frac{a \cdot b}{I_1} + \frac{6 \cdot v_1 \cdot (m+1) \cdot b}{m \cdot A_1 \cdot a} \right] + \frac{F \cdot b}{3 \cdot E} \cdot \left[ \frac{b^2}{I_2} + \frac{6 \cdot v_2 \cdot (m+1)}{m \cdot A_2} \right] - \frac{M \cdot b^2}{2 \cdot E \cdot I_2} + (F \cdot (a+b) - M) \cdot \frac{a+b}{k_1 \cdot a^2} + (F \cdot b - M) \cdot \frac{b}{k_2 \cdot a^2} \quad (6)$$

Аналогичные зависимости выводятся и с помощью предлагаемого метода расчета. Фирма так же приводит графики зависимости прогиба и угла наклона оси шпинделя от межопорного расстояния, построенные для двух компоновок шпиндельного узла (первая: обе опоры на роликовых двухрядных подшипниках; вторая: передняя опора на роликовом двухрядном подшипнике, а вторая – шариковый радиально-упорный подшипник), рис 2б. Они практически совпадают с графиками, построенными для аналогичных компоновок с использованием предлагаемого метода, рис.2 а.

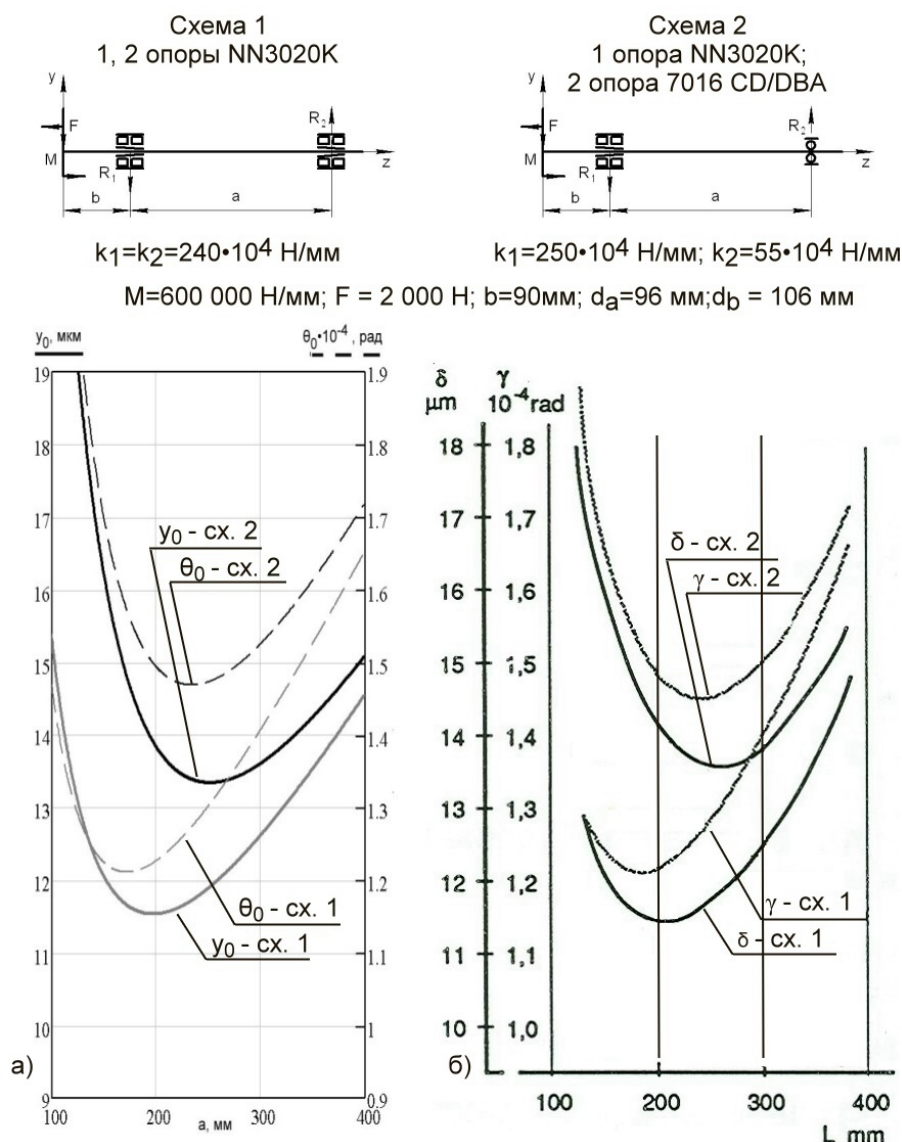


Рис. 2. Графики зависимости прогиба и угла наклона оси шпинделя от межопорного расстояния

Что касается расчета многоопорных шпиндельных узлов, то в материалах инофирм говорится о существовании специальных программ, но об исходных принципах их ничего не сообщается.

В России в последние годы В.А. Лизагубом и А.Е. Бедняшиным выполнены две фундаментальные работы, которые поводят некоторый итог исследованиям российских и иностранных специалистов.

В первой работе [5] приводятся результаты многолетних исследований шпиндельных узлов на опорах качения с целью повышения точности и технологической производительности металлорежущих станков. Автор использует известный метод расчета двухопорных шпиндельных узлов [1] и дополняет его «... с учетом действия заземляющего момента в передней опоре и деформации сдвига шпинделя».

При этом влияние деформации сдвига хорошо известно из курса «Сопротивление материалов». Фирма SKF учитывает деформацию сдвига при расчете шпиндельных узлов и приводит готовое уравнение. Проф. Пуш

В.Э. считает, что на долю деформации сдвига приходится 3...6% от общих смещений шпинделя, и ими можно пренебречь. Предлагаемый метод расчета [2] для каждой конструкции позволяет точно оценить удельное влияние деформаций сдвига не только для двухопорных, но и для многоопорных шпинделей.

Удельный вес смещений сдвига в общем балансе зависит от многих параметров конструкции. Для некоторых частных конструктивных решений, рис 3, определено удельное влияние смещений сдвига, изгиба и опор. Для шпинделей на двухрядных цилиндрических подшипниках, т. е для самых жестких подшипников, влияние деформаций сдвига достигает 17%, рис 3а, а для шпинделей на шарикоподшипниках – 6%, рис 3 б.

$$y_{оп} = -\frac{R_1}{k_1} \left(1 + \frac{b}{a}\right) - \frac{R_2}{k_2} \frac{b}{a}; y_{изг} = \frac{F}{3EI} b^3 (a+1); y_{сдв} = \frac{kF}{GS} \frac{b}{a} (a+b), \quad (7)$$

где  $S$  – площадь сечения шпинделя,  $G$  – модуль упругости второго рода.

Смещение сдвига следует оценивать, но в целом его влияние на фоне смещений изгиба и деформации опор невелико, рис 3. В любом случае метод расчета не изменяется. Учитывается известный метод деформаций независимо от принятого метода расчета.

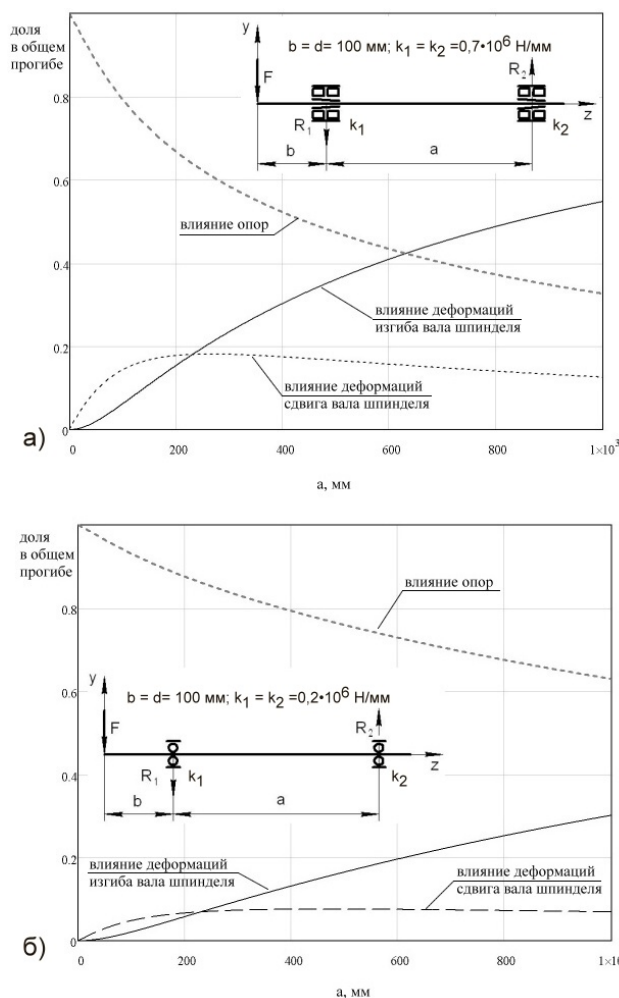


Рис. 3. Баланс различных видов упругих деформаций конструкции ШУ в зависимости от межопорного расстояния

Введение в расчет «защемляющего момента в передней опоре» аналогично использованию «угловой податливости» или «угловой жесткости». Принимается условие, что «каждая опора, состоящая из комплекта сдвоенных подшипников, рассматривается как упругая заделка, не имеющая радиального смещения». Угловая податливость определяется экспериментально.

Этот искусственный метод расчета неудобен уже тем, что угловая жесткость не задается производителем подшипников, так зависит от конкретной конструкции и компоновки шпиндельного узла. Задается только радиальная и осевая жесткость подшипников. Необходимость использования угловой жесткости не позволяет использовать метод расчета на стадии проектирования.

Может быть показано, что даже при четырех шариковых подшипниках в передней опоре все «опорные реакции» имеют одинаковое направление. То же самое мы наблюдаем и при установке в передней опоре двухрядного цилиндрического подшипника. Наличие реакций одного знака у всех подшипников, устанавливаемых в передней опоре, делает необоснованным допущение, что «каждая опора ... не имеет радиального смещения». Если есть сила реакции подшипника, то есть и его жесткость, есть и смещение.

Для оценки упругих деформаций в шпиндельных узлах и влияния на них конструктивных параметров может использоваться так же метод конечных элементов [6]. Но при этом нет сопоставимых исследований с другими методами расчета. Перечень задач статического исследования шпиндельных узлов с помощью МКЭ не перекрывает перечисленных выше возможностей предлагаемого метода. При использовании метода МКЭ при всяком изменении конструкции шпиндельного узла необходимо составлять новую конечно-элементную модель, в то время как при использовании предлагаемого метода только вводятся, исключаются или изменяются параметры, что выполняется оперативно. К тому же не очень ясна проблема ввода в расчет контактных деформаций в опорах качения при использовании метода МКЭ.

Таким образом, предлагаемый метод расчета позволяет создать физически обоснованную модель шпиндельного узла и не противоречит уже существующим методам. При этом он мобилен и прост в использовании, дает наглядную дифференцированную картину формирования линейных и угловых смещений шпинделя, жесткости и других параметров необходимых для оптимизации конструкции шпиндельных узлов.

### Литература

1. *Chvála V.* Nejvýhodnější vzdálenost ložisek vřeteha Souftryhy «Strojiren stvi», 1956 г., т. 6, №4, с. 239-243.
2. *Чернянский П.М.* Жесткость металлорежущих станков. Учебное пособие. изд. МВТУ М.: 1969 г.
3. *Чернянский П.М., Краснов И.Д.* Оптимальные параметры шпиндельных узлов с учетом нелинейной жесткости опор. Известия вузов. «Машиностроение», 1982г., №2, с. 123-127.
4. *Левин, Халл* Шпиндельные узлы для станков с высокими эксплуатационными свойствами. Прецизионные подшипники SKF. Швеция, 1992г., 142 с.
5. *Левина З.М., Зверев И.А.* Расчет статических и динамических характеристик шпиндельных узлов методом конечных элементов. Станки и инструмент., 1986г., №10



**Секция 2**  
**Инструментальная техника и технологии**

УДК 67.05

## **ПОЛУЧЕНИЕ МАКРОРЕЛЬЕФА МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА**

Костикова Дарья Сергеевна

*Студентка 6 курса*

*кафедра «Инструментальная техника и технологии»*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: О.В. Кононов,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии»*

*Оребрение* поверхности трубок предназначено для увеличения поверхности теплообмена со стороны теплоносителя, имеющего меньший коэффициент теплоотдачи. Ребристые трубки чаще всего применяются в воздухо- или газонагревателях, в воздухоохладителях и сушильных установках, реакторах, теплообменных аппаратах промышленных холодильных, кондиционирующих и криогенных установках, теплообменниках для химической промышленности и тепловых станций и т.п.. Применение их оправдано в случаях нагрева воздуха или газа горячей водой или паром, а также во всех других случаях, когда один из теплоносителей имеет большой, а другой — очень маленький по сравнению с первым коэффициент теплоотдачи, в результате чего получаются очень низкие значения коэффициента теплопередачи и соответственно большие размеры поверхности нагрева. Оребрение поверхности нагрева позволяет во многих случаях повысить теплоотвод и компактность теплообменных аппаратов.

Получением макрорельефа на трубах занимаются многие организации и уже достаточно длительное время. Существует множество методов получения оребрения, которые можно отнести к нескольким группам: механическая обработка, обработка давлением и сборочные методы.

Большинство из этих методов относится к получению рельефа на наружной поверхности. Что же касается развития внутренней поверхности, то в этой области достижения не так велики и вопрос о получении внутреннего оребрения остается открытым, не смотря на то, что отечественные предприятия все чаще используют медные трубы с внутренним макрорельефом при создании техники для кондиционирования воздуха. Применение этих труб по данным отечественных и зарубежных предприятий повышает холодопроизводительность теплообменной аппаратуры в холодильной технике как минимум на 25%.

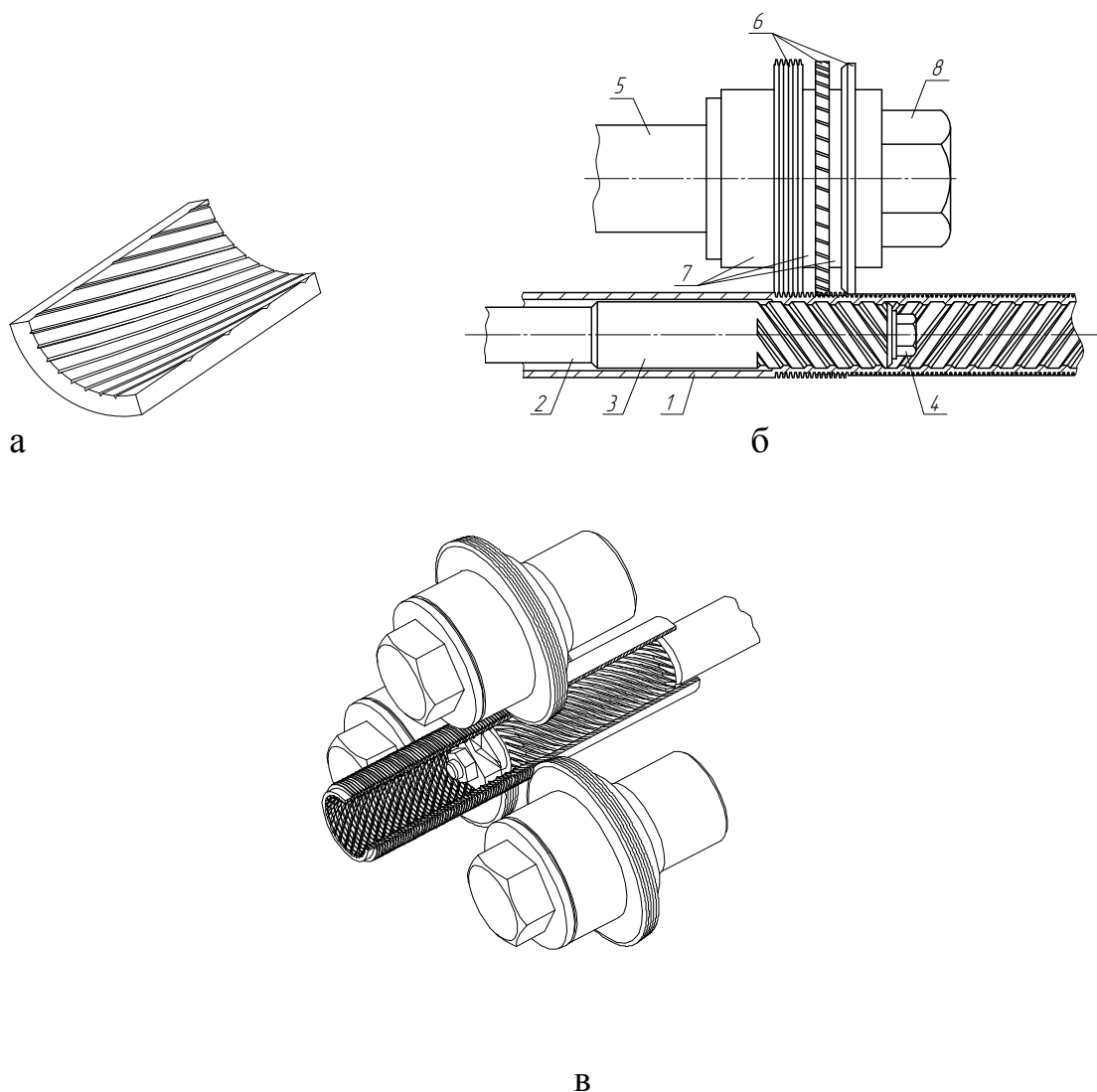


Рис. 1. Пример рельефа на внутренней поверхности (а) и методы его получения (б,в)

Ведущие зарубежные производители теплообменной аппаратуры уже давно применяют в своих изделиях медные трубы с внутренним рифлением. Причем в зависимости от требований заказчика, трубы должны различаться:

- по количеству ребер на периметре окружности (как правило, от 2 до 40 шт.)
- по углу наклона канавки к оси заготовки  $\omega$  (от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ ) (Рис. 2).

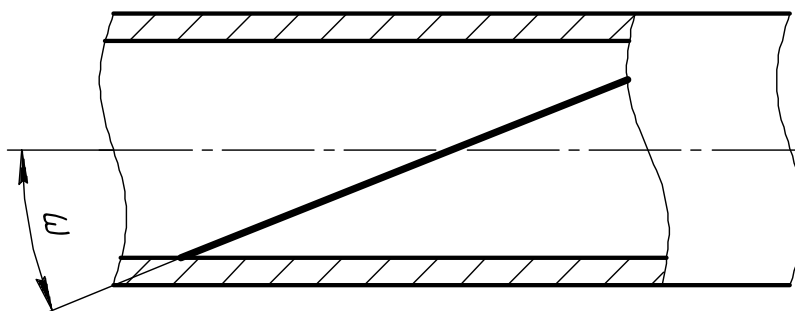


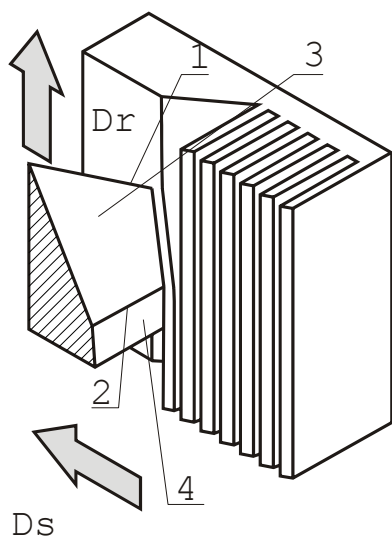
Рис. 2. Угол подъема винтовой канавки

В настоящее время для получения макрорельефа на внутренней поверхности труб в подавляющем большинстве случаев используются методы обработки давлением, т.е. обжим трубы наружными роликами на профилированной внутренней оправке (Рис. 1 б, в). Получение оребрения с помощью механической обработки с используется крайне редко, несмотря на малую энергоемкость. Данный процесс обладает низкой производительности, а применяемый инструмент обычно имеет низкую прочность из-за необходимости копирования инструментом профиля канавки.

Одним из способов, лишенных этих недостатков, является метод деформирующего резания.

Метод деформирующего резания (ДР) основан на процессе частичного срезания припуска и целенаправленного пластического деформирования подрезанного поверхностного слоя. Образующаяся при ДР стружка не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне.

Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макрорельеф.



- 1 – главная режущая кромка
- 2 – вспомогательная кромка
- 3 – передняя поверхность
- 4 – вспомогательная задняя поверхность

Рис. 3. Получение макрорельефа методом ДР

Метод ДР позволяет получать макрорельеф в виде ребер различной формы, конфигурация которых определяется геометрией инструмента (Рис. 4).

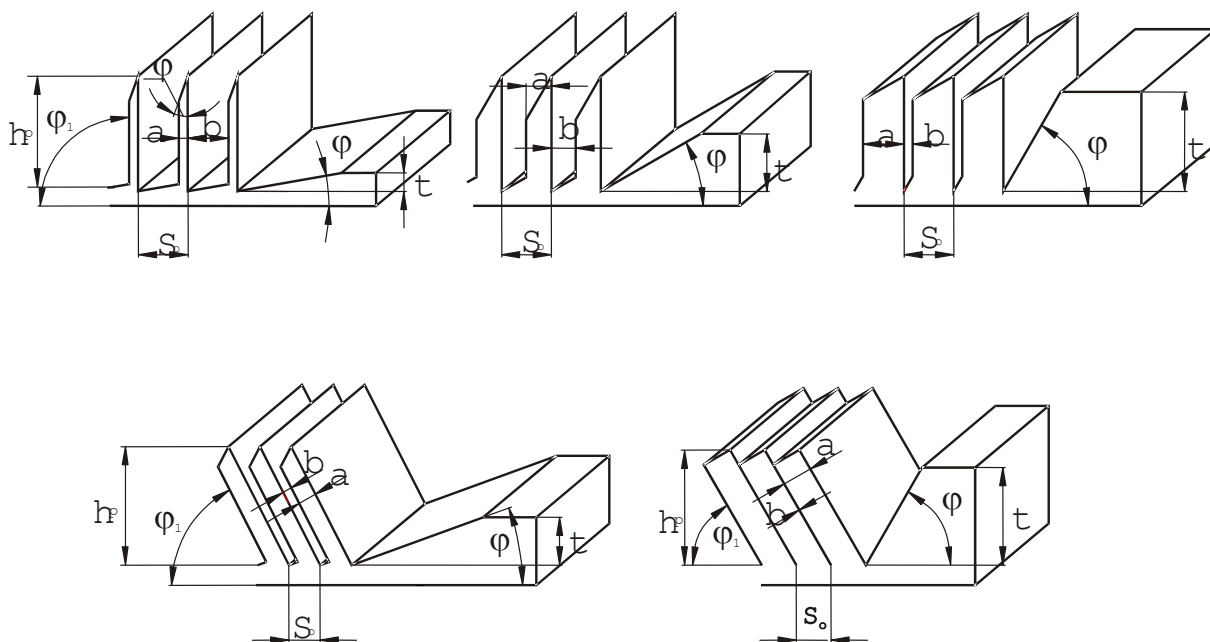


Рис. 4. Варианты макрорельефа, получаемых методом ДР. Влияние главного  $j$  и вспомогательного  $j_1$  углов в плане инструмента на геометрические параметры оребрения

Для каждой геометрии определена область существования процесса ДР(), в которой можно условно выделить три зоны :

- устойчивого получения ребер с параллельными сторонами;
- неустойчивое получение ребер с периодическим их отделением в виде стружки;
- выдавливание подрезанного материала на исходную поверхность заготовки.

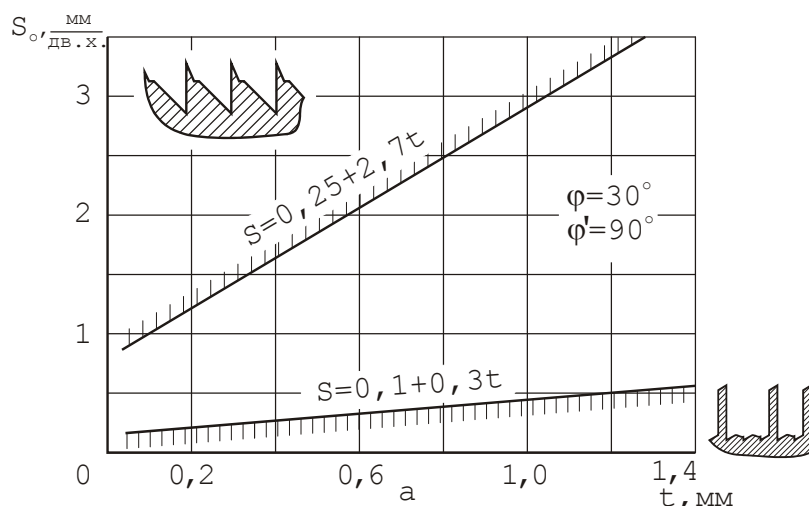


Рис. 5. Область существования процесса ДР. Обрабатываемый материал – медь М06

До недавнего времени метод ДР использовался только для получения макрорельефа на наружной поверхности трубных заготовок. И лишь в последнее время были предприняты попытки получить рельеф на внутренней

стороне труб. Чтобы получить рельеф, соответствующий зоне устойчивого оребрения области существования процесса ДР (Рис. 5), необходимо разместить внутри заготовки инструмент с большим количеством режущих вершин, что в большинстве случаев оказывается технически невозможным. Поэтому было принято решение работать в зоне выдавливания подрезанного материала на исходную поверхность заготовки.

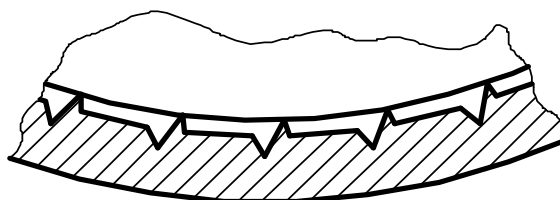


Рис. 6. Рельеф на внутренней поверхности, полученный методом ДР

Исследования силовых зависимостей ДР, проведенные ранее [3] показывают, что силы, действующие на режущий клин со стороны заготовки и образуемых ребер приводят к самозатягиванию инструмента. В случае наружного оребрения с этим эффектом приходится бороться, в то время как при внутреннем оребрении его можно использовать и управлять им.

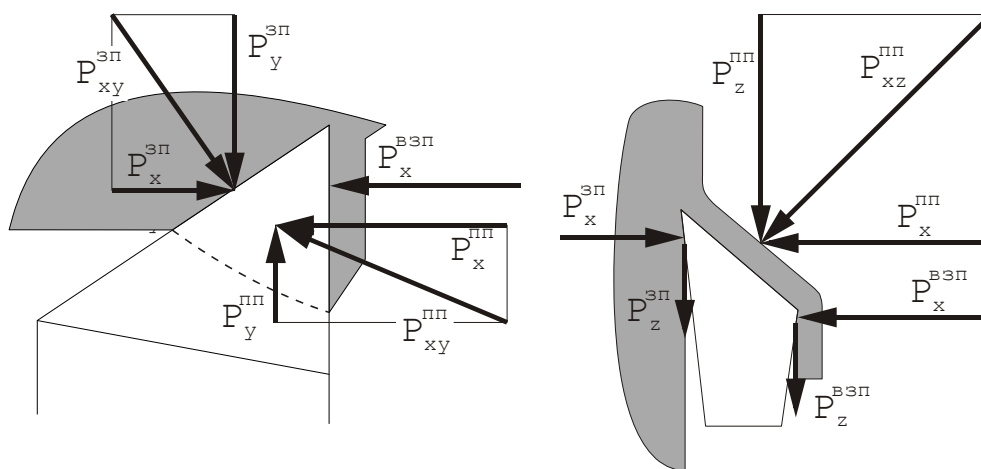


Рис. 7. Раскладка сил при ДР

Первые эксперименты показали, что внутренние канавки имеют определенный угол подъема, что позволяет говорить о верности выдвинутой гипотезы об управлении углом подъема винтовой канавки. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных экспериментов по определению зависимости угла  $\alpha$  от различных технологических и геометрических параметров (положения передней поверхности, главного и вспомогательного углов в плане, заднего угла, наличия и вида СОЖ и др.).

Эксперимент проводится на строгальном станке. В качестве режущего инструмента используется токарный резец с ТС пластиной, заточенной с геометрией для ДР.

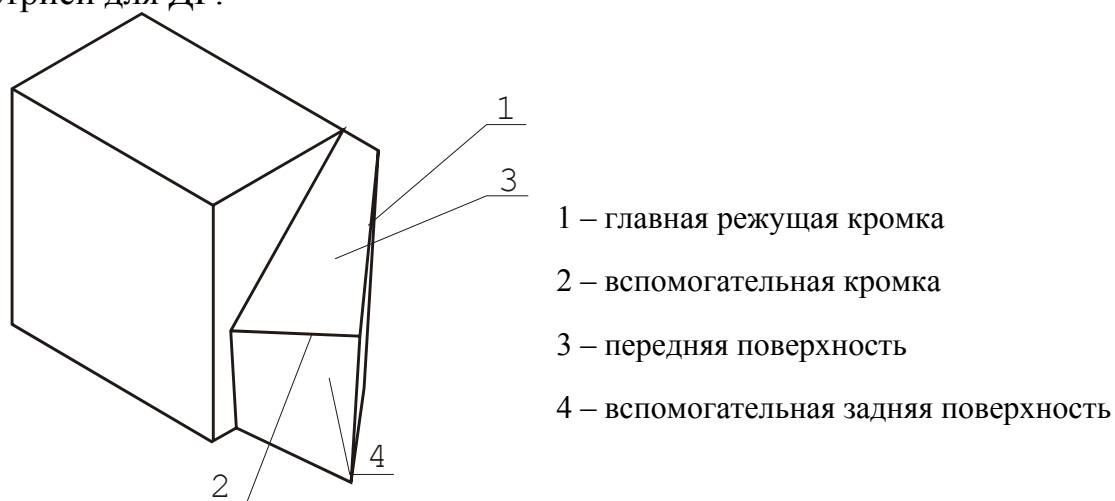


Рис. 8. Режущий инструмент для ДР

Заготовка при помощи зажимных губок закрепляется на направляющих, которые дают ей возможность свободно передвигаться под действием сил резания в направлении перпендикулярном движению резца.

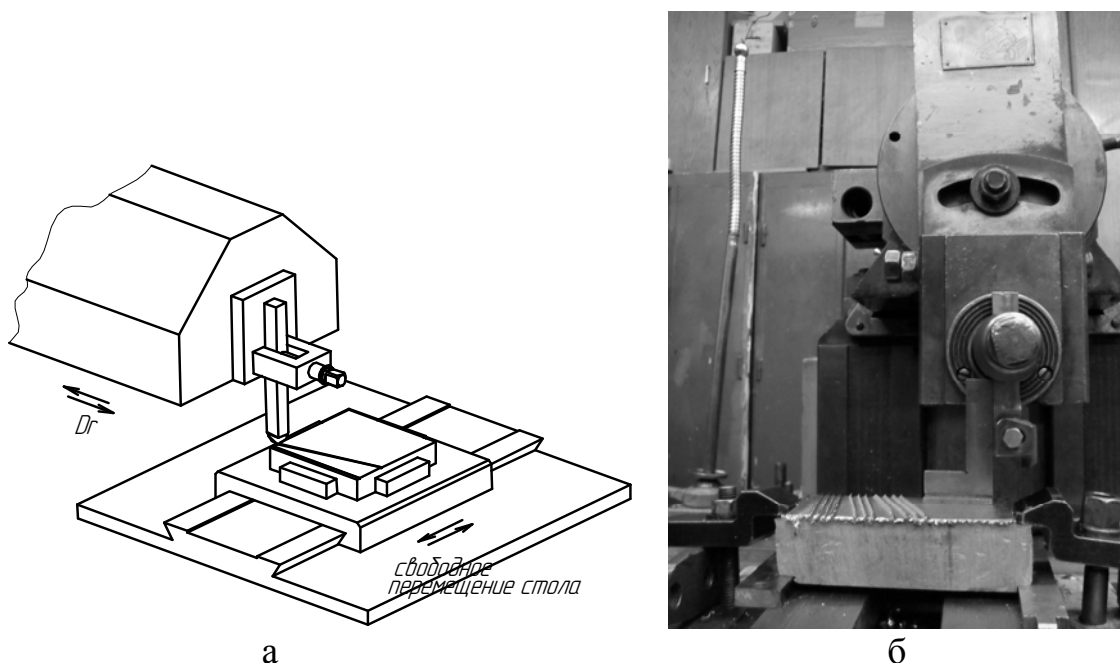


Рис. 9. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки  
В качестве образцов использовались заготовки из алюминиевого и медного сплавов

Для того чтобы движение подачи резца было гарантировано параллельно поверхности заготовки был использован принцип единства баз. Т.е. каждый раз перед проведением эксперимента базовая поверхность сострагивали заново и заготовку больше не перезакрепляли. После строгания

на поверхности заготовки остаются следы от резца. Эти риски использовались в качестве базы при измерениях.

В ходе эксперимента варьировались следующие параметры:

- положение передней поверхности (сочетание переднего угла и угла наклона главной режущей кромки)
- главный угол в плане;
- вспомогательный угол в плане;
- главный задний угол;
- наличие и вид СОЖ.

В результате эксперимента были получены наклонные ребра, имеющие в сечении различные профили.

A-A

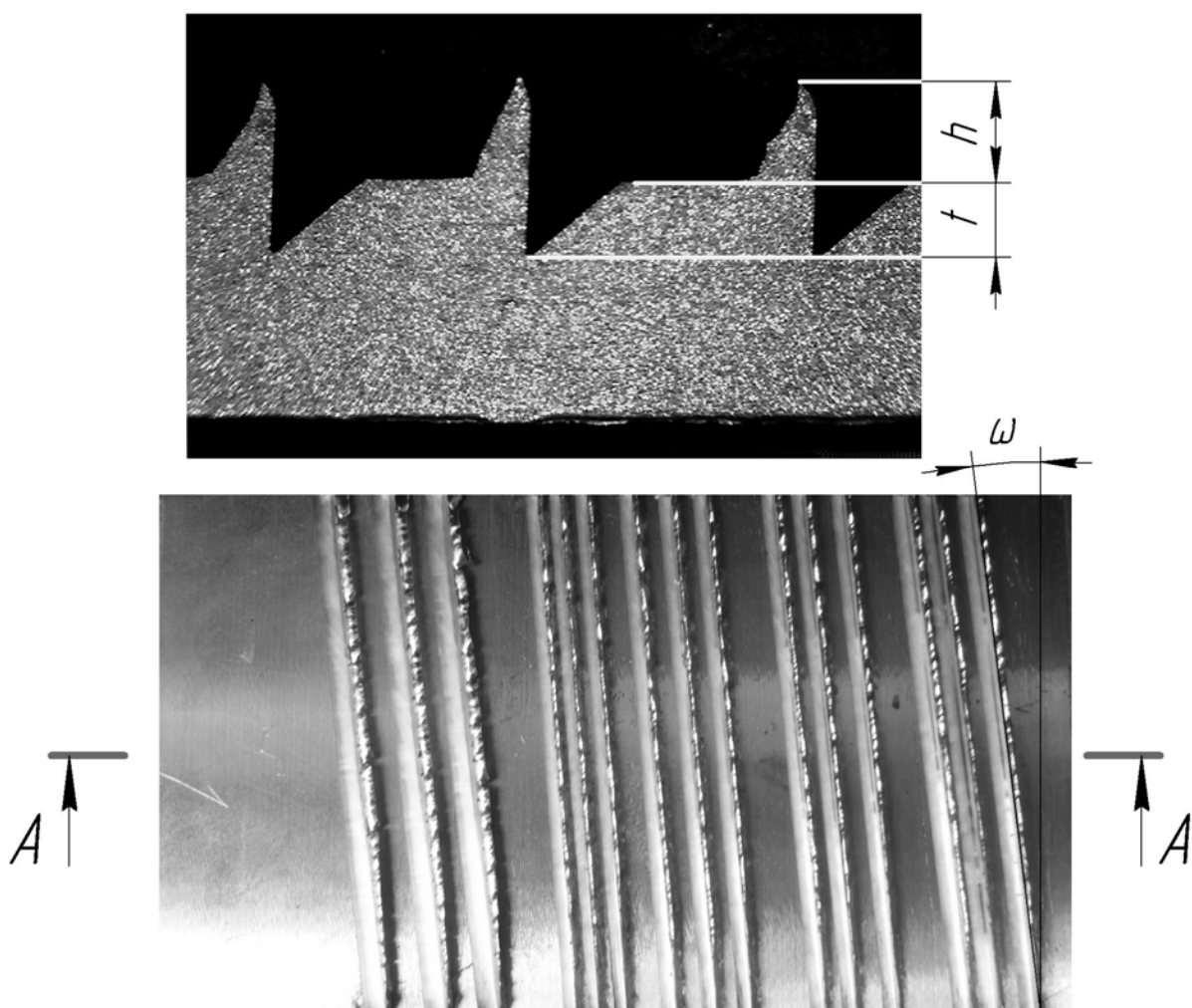


Рис. 10. Экспериментальный образец

В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры: высота ребра и угол наклона канавки (угол самозатягивания).



**Таблица 1. Зависимость высоты ребра от главного угла в плане и положения передней поверхности**

Главный угол в плане, град. Положение передней поверхности	30	45
	1 [2]	2,34
2 [1]	2,03	1,53
3	2,36	1,31

**Таблица 2. Зависимость угла самозатягивания от главного угла в плане и положения передней поверхности**

Главный угол в плане, град. Положение передней поверхности	30	45
	1	8,60
2	7,84	5,24
3	7,55	3,55

**Таблица 3. Зависимость угла самозатягивания от главного заднего угла**

Главный задний угол, град.	Угол самозатягивания, град	Высота ребра, мм
3	7,55	2,36
6	13,12	2,32
9	24,31	1,32*

\* – при глубине резания 1 мм

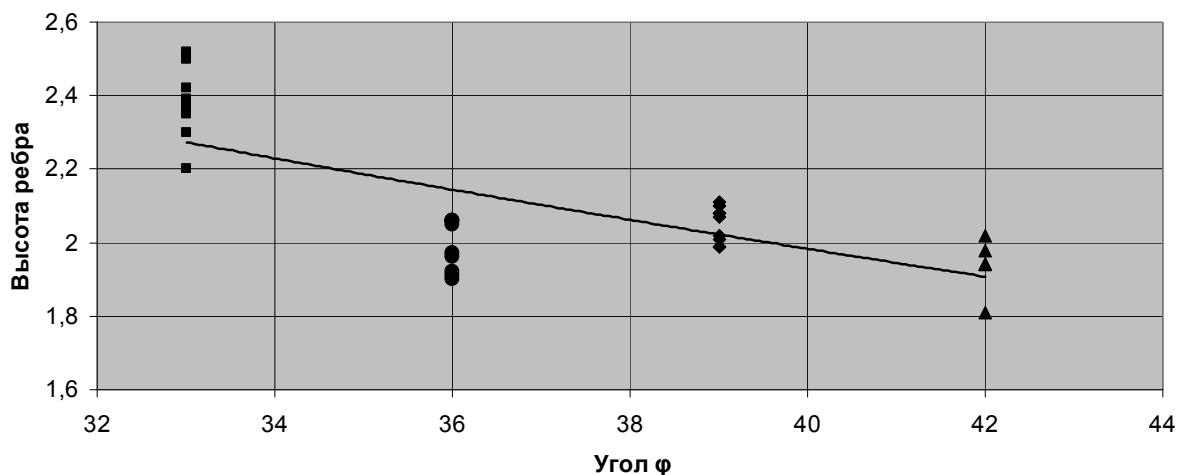


Рис. 11. Зависимость высоты ребра от угла

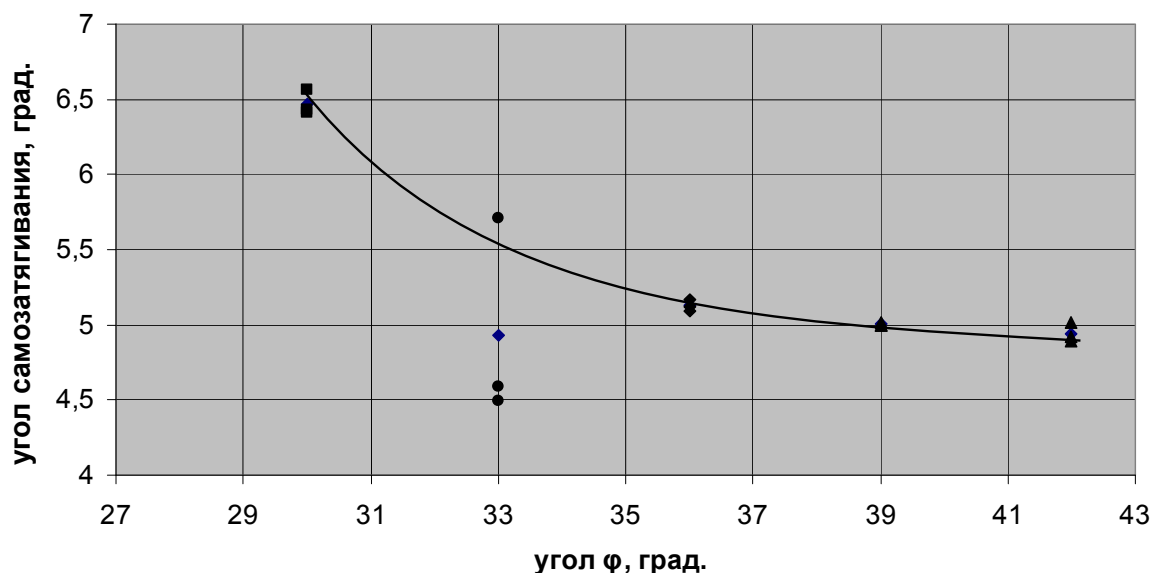


Рис. 12. Зависимость угла самозатягивания от угла

В ходе эксперимента по влиянию СОЖ на параметры получаемого макрорельефа были использованы следующие СОЖ: керосин, минеральное масло И-20, эмульсия Blascocut 2000. В результате эксперимента зависимости не обнаружено как по углу самозатягивания, так и по высоте ребра.

Как видно из графиков и таблиц самое большое влияние на угол самозатягивания оказывает главный задний угол  $\alpha$ . Однако при увеличении  $\alpha$  резко возрастает угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$ , а значит мы имеем ограничения по конструкции резца.

Однако только конструкцией резца невозможно получить весь диапазон требуемых углов, а значит, все равно придется использовать дополнительные устройства при получении внутреннего оребрения с углами подъема винтовой канавки в диапазоне от 30 до 60 град.

Для получения внутреннего макрорельефа на внутренней поверхности трубных заготовок в промышленных масштабах была разработана конструкция инструментального блока, которая позволяет получать винтовые ребра без использования дополнительного привода. В настоящее время ведется работа по изготовлению данного инструмента.

### **Литература**

1. Васильев С.Г. Разработка метода деформирующего резания для создания упрочняющих композиционных покрытий. Автореферат диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 1996. – 16 с.
2. Кононов О.В. Разработка метода деформирующего резания для получения пористых поверхностных структур. Автореферат диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 1997. – 16 с.
3. Кононов О.В. Разработка метода деформирующего резания для получения пористых поверхностных структур. Диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 1997. – 231 с.

УДК 621.9.08

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛ РЕЗАНИЯ НА ОПЕРАЦИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ**

Шуляк Ян Игоревич

*Студент 6 курса,*

*кафедра «Инструментальная техника и технологии»*

*Московский государственный технический университет им Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: С.Г. Васильев,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии»*

Важной характеристикой процесса резания металлов является сила резания. Силы резания связаны с работой, затрачиваемой на выполнение процесса резания. Работа сил резания определяет необходимую мощность приводов главного движения и движения подачи, выбор которых влияет на стоимость применяемого оборудования, а значит и на стоимость изготавливаемых деталей.

Значительная часть энергии, затрачиваемой на операции лезвийной обработки, переходит в тепловую энергию, которая вызывает нагрев режущей части инструмента, что приводит к увеличению интенсивности изнашивания режущего инструмента, снижению стойкости режущего инструмента.

Силы резания, в результате своего действия на обработанную поверхность могут вызывать изменение кристаллической структуры материала, при этом значительные пластические деформации приводят к возникновению остаточных напряжений в поверхностных слоях обрабатываемого материала, что влияет на показатели качества и эксплуатационные свойства детали, а также на величину выполняемых размеров детали.

Вышесказанное свидетельствует о необходимости проведения более глубоких исследований сил резания на операциях механической обработки. Часто целью подобных исследований является определение факторов, влияющих на силы резания, и выявление взаимосвязей между ними.

Знание функциональных зависимостей изменения сил резания позволяет создавать адаптивные системы управления для станков с ЧПУ, способных регулировать в заданных пределах силу резания за счёт регулировки режимов обработки.

Нагрузка на режущий клин в зоне резания имеет сложный характер. Между передней поверхностью и поверхностью сбегающей стружки, а также

между задней поверхностью и обработанной поверхностью, действуют неравномерно распределённые контактные давления и силы трения.

Определение всех сил и давлений, действующих на режущий клин, является сложной и трудоёмкой задачей, поэтому систему действующих на инструмент сил заменяют вектором одной равнодействующей силой или системой сил, состоящей из вектора силы и крутящего момента. В общем случае точка приложения и направление вектора сил не известны. Для упрощения решения исследовательских задач вектор равнодействующей силы принято разлагать на составляющие вектора. В зависимости от поставленных исследовательских задач, предмета исследований, схем обработки, технических возможностей по измерению и других факторов вид этого разложения может быть различным.

Одним из устройств, позволяющим решить проблему измерения составляющих сил резания является универсальный динамометр, разработанный Мухиным Б.И. Существуют универсальные динамометры Мухина Б.И. следующих моделей УДМ-100, -600, -1200. Регистрирующее оборудование, входящее в комплект динамометра, имеет ряд недостатков: большие габариты, массу, высокое энергопотребление. Тензометрический усилитель 4АНЧ22 требует длительного прогрева перед началом работы и периодической ручной настройки при длительных измерениях. Применение осциллографа позволяет вести наблюдение за изменением регистрирующего сигнала при этом регистрация величины сигнала в единицу времени затруднено, отсутствует возможность автоматизации сбора и обработки данных.

Для устранения приведённых выше недостатков на основе динамометра модели УДМ-600 было разработано устройство измерения составляющих сил резания, блок-схема которого изображена на рис. 1. Устройство состоит из динамометра-датчика модели УДМ-600, платы балансировочных сопротивлений (ПБС), платы 16-канального усилителя ЛА-УН16, устройства сбора данных (УСД) NI USB-6009, персонального компьютера. Плата ЛА-УН16, УСД NI USB-6009, ПБС собраны в отдельном корпусе блока усиления и преобразования сигналов (БУПС).

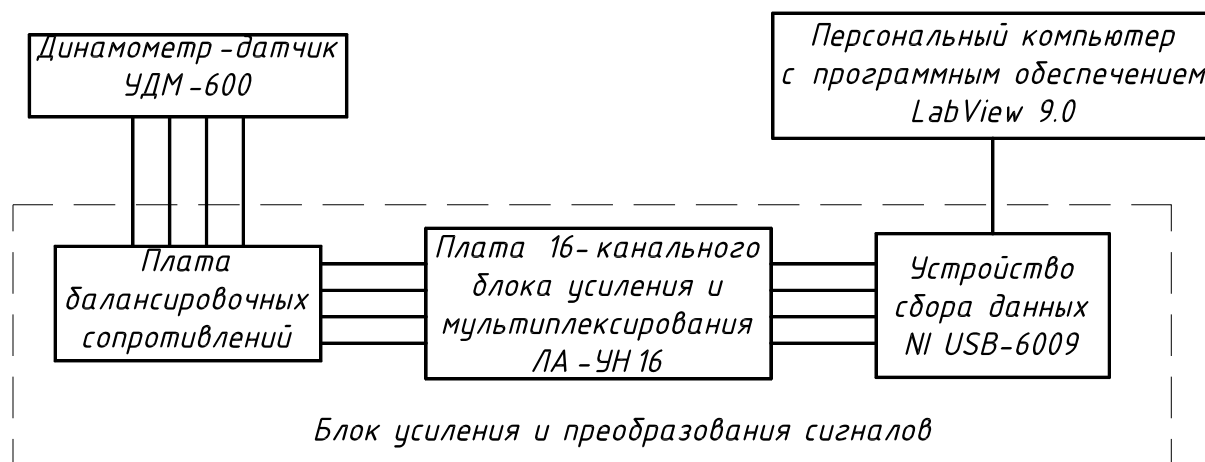


Рис. 1. Блок схема устройства измерения сил

Динамометр-датчик УДМ-600 способен одновременно воспринимать три составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  и крутящий момент  $M_{кр}$ . Обозначение сил измеряемых динамометром совпадают с обозначением составляющих сил резания, изображённых на рисунке 1а. Динамометр измеряет крутящий момент  $M_{кр}$ , действующий в горизонтальной плоскости.

Работа динамометра основана на регистрации изменений значений сопротивлений тензометрических датчиков, вызванных действием измеряемой силы. Внутри динамометра расположена державка, выполненная в виде квадратной пластины с круглым фланцем для крепления к ней сменных приспособлений. Державка установлена на шестнадцати упруго деформируемых опорах. Конструкция опор такова, что жёсткость опоры вдоль её оси примерно в 100 раз меньше жёсткости в поперечном направлении. К каждой опоре вдоль её оси приклеен проволочный тензорезистор с номинальным сопротивлением 100 Ом. Расположение опор в динамометре и схема соединений тензорезисторов с обозначением номеров контактов на разъёме динамометра показаны на рисунке 2. Такое соединение тензорезисторов позволяет создавать разные измерительные схемы.

В изготовленном устройстве измерения сил используется мостовая схема измерения Уитсона. Тензорезисторы динамометра УДМ-600, соединённые по схемам на рисунке 2, подключаются к плате балансировочных сопротивлений. На ПБС смонтированы постоянные и переменные подстроечные резисторы, которые образуют с тензорезисторами динамометра-датчика мостовые схемы измерения, приведённые на рисунке 3.

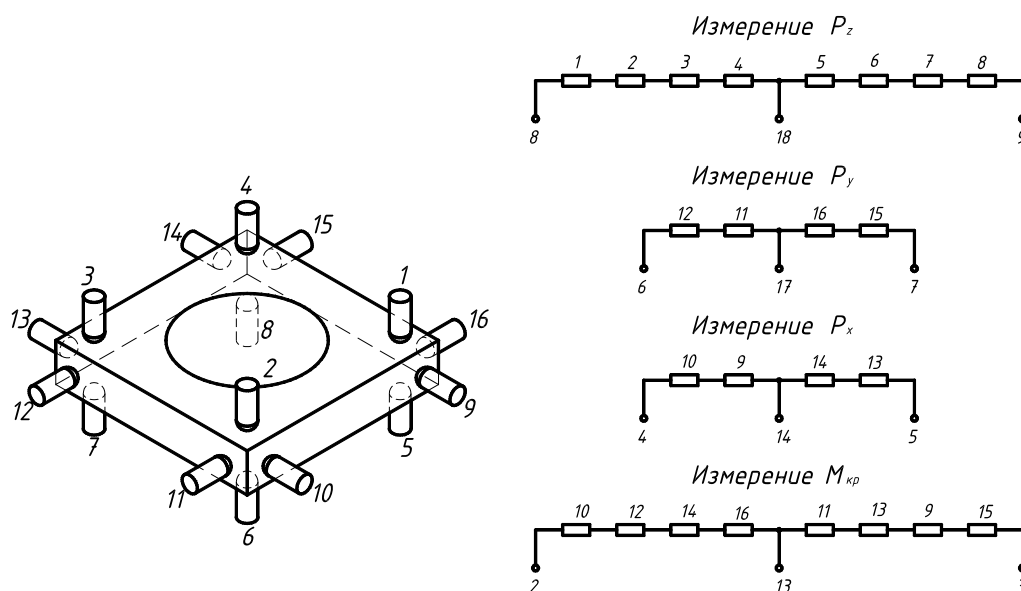


Рис. 2. Расположение опор в динамометре и схемы соединения тензорезисторов

На рисунке 3а приведены мостовые схемы соединения резисторов для измерения составляющей силы резания  $P_z$  и крутящего момента  $M_{кр}$ , на

рисунке 3б приведена схема для измерения составляющих сил резания  $P_x$  и  $P_y$ . Плечи I и III образованы последовательным соединением тензорезисторов динамометра-датчика, плечи II и IV состоят из балансирующих сопротивлений.

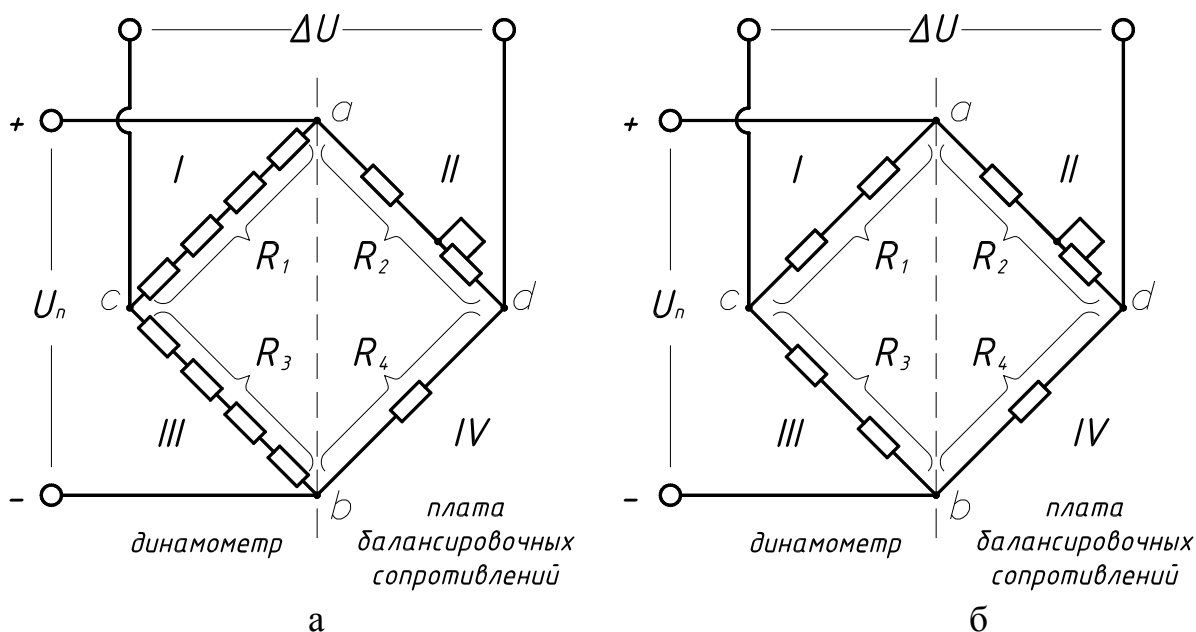


Рис. 3. Мостовые схемы измерения составляющих сил резания

Питание измерительной схемы осуществляется стабилизированным источником постоянного напряжения, встроенным в УСД NI USB-6009. Напряжение питания  $U_n$  составляет  $\pm 5\text{В}$ . Плечо IV включает одно постоянное сопротивление, плечо II состоит из последовательно соединённых резисторов, один из которых постоянный, а другой подстроечный. Общее сопротивление плеч I, II, III и IV обозначим  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  соответственно.

Значение выходного напряжения  $\Delta U$  тензометрических мостов, изображённых на рисунке 3, определяется по формуле:

$$\Delta U = U_n \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right), \quad (1)$$

или по формуле:

$$\Delta U = U_n \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right), \quad (2)$$

где  $U_n$  – напряжения питания, В;  $R_i$  – активное сопротивление соответствующего плеча мостовой схемы, Ом. Данные формулы справедливы при допущениях, что используется источник питания постоянного тока с пренебрежимо малым сопротивлением, а сопротивление нагрузки между точками  $c$  и  $d$  намного больше полного сопротивления любой ветви моста.

Постоянные и подстроечные резисторы подбираются таким образом, чтобы за счёт регулировки величины сопротивления подстроечных

резисторов максимально точно выполнялось условие равновесия моста в ненагруженном состоянии:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (3) \quad [3]$$

Из формулы (3) следует, что мост уравновешен, если соблюдается условие:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_3} \quad (4)$$

На практике сопротивление плеча II не равно величине  $R_2$ , определяемой по формуле 4, и имеет значение  $R_2'$ :

$$R_2' = R_2 + \Delta r = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_3} + \Delta r \quad (5)$$

где  $\Delta r$  – погрешность регулирования моста, Ом.

С учётом погрешности регулировки  $\Delta r$  формула (1) примет вид:

$$\Delta U = U_i \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + \Delta r + R_4} \right) \quad (6)$$

Динамометр-датчик сконструирован так, что при действии нагрузки тензорезисторы в одном плече увеличивают, а в другом плече уменьшают своё сопротивление. Если сопротивление тензорезисторов плеча I увеличилось и составляет  $R_1 + \Delta R_1$ , то сопротивление плеча III уменьшилось и составляет  $R_3 - \Delta R_3$ . Величины  $\Delta R_1$  и  $\Delta R_3$  – суммарные изменения сопротивлений I и III плеча соответственно. Таким образом, величина выходного напряжения  $\Delta U_n$  в нагруженном состоянии примет вид:

$$\Delta U = U_i \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_3 - \Delta R_3} - \frac{R_4}{R_2 + \Delta r + R_4} \right) \quad (7)$$

В используемом динамометре-датчике УДМ-600 разность между величинами  $R_1$  и  $R_3$  пренебрежимо мала, поэтому можно считать, что  $R_1 = R_3 = R$ , а  $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ . Поскольку в ненагруженном состоянии мост должен быть уравновешен, то значения сопротивлений плеч II и IV должны быть одинаковыми, то есть  $R_2 = R_4 = R_a$ . С учётом этих допущений формула (7) принимает вид:

$$\Delta U = U_i \left( \frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R_a}{2R_a + \Delta r} \right) \quad (8)$$

Преобразуем формулу (8) и запишем в следующем виде:

$$\Delta U = U_i \cdot \left( \frac{\Delta R}{2 \cdot R} + \frac{\Delta r}{2(2R_a + \Delta r)} \right) = \Delta U_t + \Delta U_r \quad (9)$$

где  $\Delta U_t$  – изменение сигнала, вызванное действием составляющей силы резания,  $\Delta U_r$  – величина начального уровня сигнала, вызванная неточностью балансировки.

Изменение сигнала  $\Delta U_t$  определяется по формуле:

$$\Delta U_t = U_i \frac{\Delta R}{2 \cdot R} \quad (10)$$



Величина  $\Delta U_r$  определяется по формуле:

$$\Delta U_r = U_i \frac{\Delta r}{2(2R_a + \Delta r)} \quad (11)$$

Анализ формулы (11) позволяет подбирать величину постоянных и подстроечных сопротивлений для обеспечения плавности регулировки начального уровня сигнала при проведении измерений.

Величина выходных сигналов с тензометрических мостов при действии на динамометр даже значительных нагрузок недостаточна для их регистрации с использованием УСД NI USB-6009. Для усиления сигнала используется 16-канальный усилитель модели ЛА-УН16.

В устройстве измерения сил применяется усовершенствованная модель платы ЛА-УН16. Стандартная модель содержит 16 каналов, каждый из которых способен усиливать сигнал в 1, 10 и 100 раз. Используемая модель способна усиливать сигнал в 1, 10, 100, 400 и 1000 раз. Для усиления сигнала тензометрических мостов используется 4 канала в режиме усиления в 400 раз.

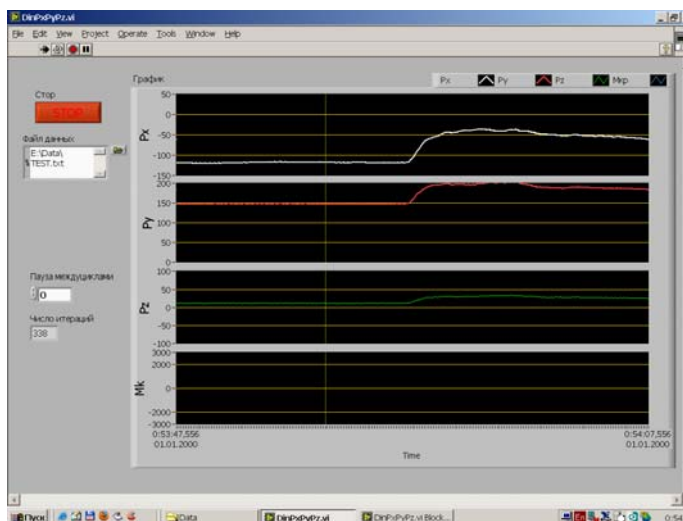
Величина сигнала, получаемая с усилителя, определяется по формуле:

$$\Delta U_k = K \cdot U_i \left( \frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R_a}{2R_a + \Delta r} \right), \text{ В} \quad (12)$$

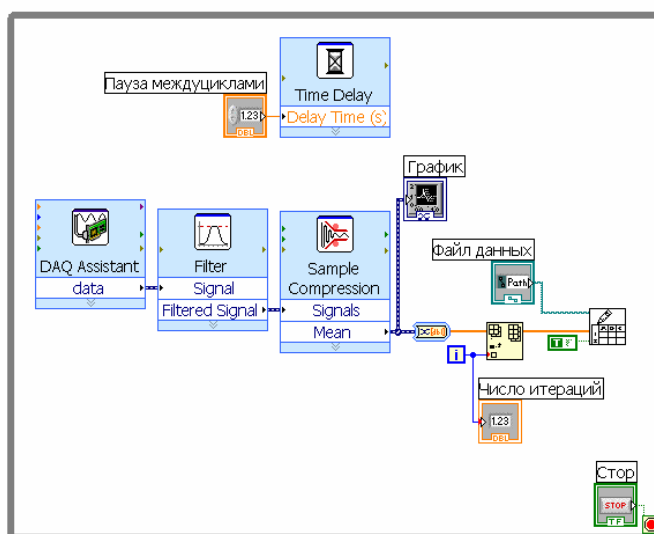
где  $K$  – выбранный коэффициент усиления. При проведении опытов, удобно оперировать значениями  $\Delta U$ , выраженными в милливольтгах, поэтому формулу 12 можно выразить в виде:

$$\Delta U_k = 1000 \cdot K \cdot U_i \left( \frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R_a}{2R_a + \Delta r} \right), \text{ мВ} \quad (13)$$

УСД NI USB-6009 осуществляет регистрацию и преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал, передаваемый на персональный компьютер через интерфейс USB. Цифровая информация обрабатывается с помощью экспериментального виртуального инструмента DinPxPyPz, разработанного в среде графического программирования LabVIEW 9.0. На рисунке 4 изображён интерфейс разработанного виртуального инструмента (рис.4а) и его графический код (рис.4б).



а



б

Рис. 4. Виртуальный инструмент DinPxPyPz и его графический код

Экспериментальный виртуальный инструмент DinPxPyPz способен отображать изменение регистрируемого сигнала в реальном времени, записывать в текстовый файл массив значений напряжения  $\Delta U_k$ , выраженное в милливольтках. Данный виртуальный инструмент применяется для настройки начального уровня сигнала и для наблюдения за устойчивостью заданного уровня во времени, а так же для демонстрации работы устройства измерения сил.

Среда графического программирования LabVIEW 9.0 предоставляет широкие возможности по регистрации, записи и анализу сигнала, а также по проведению математического анализа полученных данных. В зависимости от конкретных исследовательских целей формируется виртуальный инструмент, с набором необходимых функций. Важным преимуществом данного программного обеспечения является наличие возможности быстрого и гибкого изменения, корректировки или настройки разработанных виртуальных инструментов непосредственно в процессе работы.

Разработанное устройство измерения сил позволяет проводить измерения составляющих сил резания на операциях точения, фрезерования и сверления. Обеспечена возможность наблюдения изменения величины составляющих сил резания в процессе обработки. Используемое программное обеспечение предоставляет широкие возможности по регистрации, записи и анализу сигналов, поступающих с динамометра-датчика. Применяемое оборудование позволяет совершенствовать устройство измерения составляющих сил резания, путём добавления к нему блоков, расширяющих его функциональные возможности.

### **Литература**

1. *Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резание металлов: Учебник для машиностр. И приборостр. Спец. Вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с., ил.
2. *Хорна О.* Тензометрические мосты (перевод с чешского), М. –Л., Госэнергоиздат, 1962, 336 с. с. черт.
3. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие / Под ред. Р.А.Макарова.– М.: Машиностроение, 1975.– 288 с.

УДК 66-965

## **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНОГО СЛОЯ ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Круглов Павел Юрьевич

*Студент 4 курса,  
кафедра «Машины и обработка металлов давлением»  
Ульяновский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Курганова Ю. А.,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и обработка  
металлов давлением»*

Совершенствование технических систем различного назначения в современных условиях жесткой конкуренции и повышенных требований к точности, надежности, экологической безопасности и функциональности изделий невозможно без комплексного использования достижения в областях технических наук: теория обработки металлов давлением, машиноведение, материаловедение.

В настоящее время композитные материалы являются наиболее перспективными конструкционными материалами в машиностроении благодаря комплексу свойств, приобретаемых при совмещении разнородных материалов. Особенностью материалов данной группы является возможность формирования не только целостных деталей, но и сложных композиций. Основной комплекс свойств в большинстве случаев эксплуатации деталей обеспечивается поверхностными слоями. Достижение данных характеристик может быть реализовано путем создания функционального поверхностного композитного слоя [1].

Рабочие части инструмента – штампа работают в условиях повышенного износа, высоких удельных давлений, достигающих 2000-2500 МПа, и больших температурных перепадов вызванных процессом деформирования. Частые поломки штампов, проявление неремонтируемых дефектов, а, следовательно, низкая работоспособность препятствуют эффективной производительности штамповочного производства. Это представляет собой достаточно серьезную проблему, поскольку не позволяет эффективно изготавливать соответствующие современным требованиям детали изделий машино- и приборостроения. Так же к проблемам современного штамповочного оборудования можно отнести отсутствие эффективных и внедренных в производство способов, которые позволяют решать эти проблемы. Основные дефекты штампов и матриц: трещины, сколы, выгарины.

Существенно снизить количество таких дефектов позволяет метод плазменного напыления порошковых алюмокерамических покрытий, с помощью установки электроплазменного напыления.

Актуальность работ данного направления заключается в массовой потребности увеличения ресурса формообразующего инструмента.

Основной целью данной работы является увеличение ресурса работы формообразующего инструмента, а так же уменьшения количества переходов технологических операций путем плазменного напыления высокоизносостойких покрытий на рабочую поверхность. [Рис.1-2].



Рис.1. До напыления



Рис.2. После напыления

Актуальность работ данного направления заключается в массовой потребности увеличения ресурса формообразующего инструмента.

Основной целью данной работы является увеличение ресурса работы формообразующего инструмента путем плазменного напыления высокоизносостойких покрытий на рабочую поверхность.

Для достижения поставленной цели были сформулированы две группы задач:

Первая - подбор оптимального фазового и химического состава напыляемой смеси, выбор методов предварительного очищения поверхности и ее активации, выбор режимов работы плазмотрона, конфигурации смесителя, подбор газовой смеси; определение расстояния от сопла плазмотрона до стола и времени контакта (напыления).

Вторая - анализ полученных образцов, формирование базы данных по подбору состава напыляемой смеси и режимов напыления, оценка результатов.

Современное плазменное напыление развивается по трем основным направлениям. Напыление в струе защитного газа, напыление в условиях

динамического вакуума напыление в контролируемой среде. При плазменном напылении порошковых покрытий процесс взаимодействия материалов покрытия и поверхности подложки в значительной степени зависит от состояния последней. Вследствие этого применяют различные способы очистки и активации напыляемой поверхности. Используемые в настоящее время механические, химические и электрические методы подготовки поверхности имеют ряд ограничений по своим возможностям. Основным недостатком этих методов состоит в том, что они проводятся в атмосфере воздуха или защитного газа. Активность напыляемой поверхности в этом случае быстро падает из-за адсорбции газов и окисления. Механическим методом нельзя обрабатывать изделия из тонких материалов, при химической обработке остаются следы химических реакций – это снижает адгезию [2-3].

В данном методе напыление покрытий производится с использованием газовых разрядов, возбуждаемых в контролируемой среде, в которой производится напыление. При этом процессы активации поверхности и плазменного напыления совмещаются в одном вакуумном объеме - это является уникальностью и существенным отличием данного метода. Газоразрядная среда является “бесконтактным методом”, позволяющим обрабатывать изделия из тонких материалов. Полученные образцы анализируются металлографическим методом, методом неразрушающего контроля остаточных напряжений на приборе СИТОН-АРМ. Использование газовых разрядов, возбуждаемых в контролируемой среде, в которой производится напыление, позволяет получать уникальное по своим свойствам покрытие.

Новизной данного метода является напыление материалов разного фазового состава, а так же разработанный и ранее не используемый способ напыления. А так же получение деталей, в результате комбинации физико-химических методов обработки поверхности, с уникальным поверхностным слоем.

Метод обеспечивает повышение коэффициента использования деформируемого материала за счет перераспределения тангенциальных и касательных напряжений в заготовке, формирование облегченного скольжения дислокационных структур, формирующих состояние оптимального прохождения процесса деформирования.

Имеется патент на изобретение «Способ получения композиционных покрытий на основе алюминиевых сплавов» №2353703. А также патент на полезную модель № 67902 «Устройство для механического легирования материалов на основе цветных сплавов частицами керамики».

Напыление осуществлялось на установке ПП-25 Саратовского государственного технического университета [2-4], при участии д.т.н., президента научно-промышленной ассоциации «Плазма Поволжье», профессора Лясникова В.Н.

Принцип работы данной установки заключается в генерации потока низкотемпературной плазмы воздуха или продуктов горения углеводородного газа в воздух. В сформированный поток плазмы вводится порошкообразный материал и направляется на предварительно подготовленную поверхность детали. Частицы напыляемого материала (рисунок 3) в струе плазмы нагреваются и ускоряются и, попадая на поверхность детали, сцепляются (сплавляются) с ней и образуют плотное покрытие. Толщина слоя зависит от количества, введенного в плазменную струю порошкового материала и относительной скорости перемещения плазмотрона и напыляемой детали [4]. Характеристики напыляемого материала приведены в таблице 1.



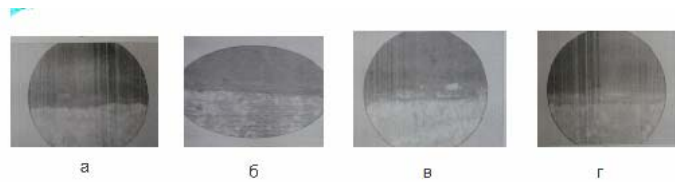
Рис. 3. Напыляемый порошок

**Таблица 1. Характеристики напыляемого материала**

Материал	Размеры частиц	Процентное содержание в составе порошка		
		50%	70%	88%
Порошок AL	2 мкм	50%	70%	88%
Порошок SiC	28–35 мкм	50%	30%	12%

Разработана блок схема плазменного напыления, позволяющая, исходя из эксплуатационных характеристик инструмента, а так же вида подложки и степени ее подготовки, подобрать оптимальный фазовый и химический состав напыляемого порошка. И режим работы плазмотрона.

Так же было проведено исследование образцов на адгезию, на основе этих испытаний была получена зависимость уровня адгезии от дистанции напыления и материала подложки (рисунок 4).



Морфология покрытия Амг-1+5% SiC на подложку из стали 3 дистанция напыления: а 80мм, б 60мм, в 45мм, г 45мм на подложку из Д16

Схема измерения адгезии

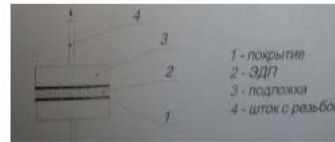


Рис.4. Зависимость уровня адгезии от дистанции напыления и материала подложки

Были проведены испытания на зависимость пористости от дистанции напыления. Полученная графическая зависимость позволяет подобрать оптимальную дистанцию для минимизации пористости (рисунок 5).



Исходные образцы(Сталь 3 и Д16) – диаметр 20мм, h16мм.

График изменения пористости от дистанции напыления

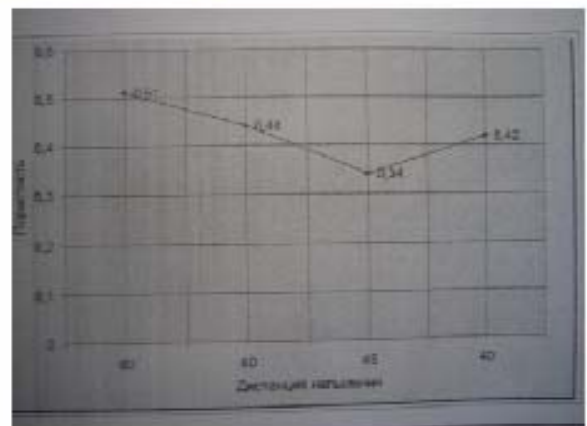


Рис. 5. Зависимость пористости от дистанции напыления

### Описание продукта или услуги

Технология плазменного напыления композитного покрытия, позволяющая повысить ресурс формообразующего инструмента.

### Маркетинговый анализ

Штамповочное производство нуждается в массовой потребности увеличения ресурса формообразующего инструмента. Низкая



работоспособность препятствуют эффективной производительности. Так же к проблемам современного штамповочного оборудования можно отнести отсутствие эффективных и внедренных в производство способов, которые позволяют решать эти проблемы.

### **Стратегия продвижения товара**

Основными потребителями является весь спектр машиностроительного производства. В Ульяновской области это ОАО «УЗТС», ОАО «УАЗ», ЗАО «Автодетальсервис», ОАО «Утес», ОАО «УМЗ», ЗАО «Авиастар». А также ОАО «ТВЕРЬТОРФ» ЗАО «ТВЕРЬРЕГИОНТОРФ» в Твери.

### **Финансовый план**

Необходимость приобретения оборудования общей стоимостью 200 тыс. руб. Расчет всех денежных потоков проекта будет приведен в условиях реального производства, с учетом номенклатуры изделий и объемов производственных партий.

### **Материальные затраты**

- Затраты на порошок составляют 63000 руб. за 1 тонну.
- Затраты на аргон при эксплуатации установки составляют 26,1 руб/ч.
- Общие затраты на воду при эксплуатации установки составляют 6,6 руб/ч.
- Затраты на электроэнергию при эксплуатации установки составляют 7,3 руб/ч.

### **Затраты времени**

Время упрочнения пуансона вырубного штампа диаметром 50 мм составляет порядка 5 мин, время упрочнения матрицы гибочного штампа площадью 20 см<sup>2</sup> составляет порядка 7 минут.

### **Планируемые этапы работы**

Научные результаты проекта планируется оформить в виде базы данных подбора смеси порошков и режимов напыления в зависимости от вида инструмента. Планируется опубликование статей, а так же дальнейшее патентное исследование.

На основе научных результатов проекта будет создана технология плазменного напыления композитного покрытия, позволяющая повысить ресурс формообразующего инструмента. Напыленный слой обеспечивает повышение коэффициента использования деформируемого материала за счет

перераспределения тангенциальных и касательных напряжений в заготовке. Получение зависимости характерных настроек плазмотрона, конфигурации смесителя, состава композитной смеси на ресурс работы формообразующего инструмента.

### Выводы

Таким образом, в ходе работы установлено:

- На энтальпию плазменного потока влияет расход плазмообразующего газа: с его повышением, понижается площадь поверхности вследствие уменьшения диаметра проводящего столба.
- Разработаны режимы напыления и составы напыляемых материалов.
- На скорость напыления влияет дисперсность смеси.
- Напыление высоко износостойких покрытий на рабочую поверхность – экономически выгодный, а так же один из наиболее эффективных методов повышения конструкционной прочности штамповой оснастки и инструмента, более чем в 1,5 раза.
- На пористость полученной поверхности влияет дистанция напыления а так же материал подложки.
- Установлен факт невозможности эффективного напыления на данном оборудовании порошков дисперсностью менее 10 мкм.

### Литература

1. *Кудинов В.В.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: Машиностроение, 1993. – 488 с.
  2. *Лясников В.Н.* Проектирование электроплазменных технологий и автоматизированного оборудования / В.М. Тараң, С.М Лисовский, А.В. Лясникова - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 206 с.
  3. *Панталеенко Ф.И., Любецкий С.Н.* Материалы, технология и оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин. Ч.1 Наплавка и напыление. - Новополюцк, 1994. – 116 с.
  4. *Бородин И.П.* Материалы 11 международной научно-практической конференции «Ресурсо-сберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин» – СПб 2009. – 252с.
- Публикации автора по теме работы:
5. *Круглов П.Ю.* ХУ Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых Современные техника и технологии СТТ'2009 «Исследование свойств и методов упрочнения материалов для инструментов ОМД».
  6. *Круглов П.Ю.* Всероссийский молодежный выставка-конкурс прикладных исследований, изобретений и инноваций «Методы упрочнения штамповой оснастки методом плазменного напыления» - С.163.

7. *Круглов П.Ю.* 12-ая школа-семинар – Актуальные проблемы физической и функциональной электроники, аккредитована Фондом содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе У.М.Н.И.К. «Методы повышения стойкости и производительности штамповой оснастки» - С.49-50.

**Секция 3**  
**Технологии машиностроения**

УДК 68. 7215

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

Менкиджанов Евгений Геннадьевич

*Студент 4 курса*

*факультет «Авиационные приборы и комплексы*

*Московский колледж управления и новых технологий*

*Научный руководитель: В.Н. Соколов*

*кандидат технических наук, зам. директора ФГУП МОКБ «МАРС»*

Последние десятилетия 20 века характеризуются компьютеризацией всех видов деятельности человека: решение научных задач, проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, автоматизация производственной, коммерческой, банковской и других сфер.

Развитие этой тенденции способствовало широкомасштабное применение персональных компьютеров, средств телекоммуникаций, вычислительных сетей: локальной вычислительной сети, глобальной сети Internet.

В этот период было осознано, что информационные ресурсы любой страны по стоимости соизмеримы с отдельными видами природных ресурсов и в конкурентной борьбе наукоемкой технически сложной продукции важнейшими фактором являются современные информационные технологии (ИТ) на принципах CALS.

CALS(Continuos Acquisition and Life Cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок жизненного цикла) базируется на локальных решениях, разработанных и реализованных на предыдущих этапах развития информационных систем ( САПР-К, САПР-Т, АСУТП, АСУ различных уровней, отдельные компьютеризованные производства и др.) при разработке, производстве, эксплуатации сложной наукоемкой продукции, которая требует создания, преобразования, передачи между различными участниками жизненного цикла изделия (ЖЦИ) больших объемов технической информации.

Цель данной работы – изучение и оценка перспективности применения CALS технологий на примере отечественного авиадвигателестроения.

Актуальность внедрения CALS-технологий вызвана тем, что многие ведущие авиадвигателестроительные фирмы мира установили негласный норматив – 30-36 месяцев на создание новой конструкции двигателя четвертого и пятого поколений. При этом резко сокращено число экземпляров двигателей, используемых для испытаний и доводки. Ясно, что для таких рекордных сроков необходимы революционные преобразования по

применению предшествующего научно-технического задела и информационных технологий в практике проектирования. Преобразования охватывают как организацию работ и методы проектирования, так и программное обеспечение, математические модели и методы моделирования, технологию поддержки и сопровождения изделия в течение всего ЖЦ.

Современное конструкторское бюро немислимо без широкого внедрения в практику работы вычислительной техники, обеспечивающей весь цикл создания конструкции газотурбинного двигателя. Для интеграции авиадвигателестроительной отрасли в мировое сообщество разработчиков и установок насущным вопросом и стал переход на CALS-технологии, которые должны обеспечить на мировом рынке конкурентоспособность отечественной продукции.

Проблема сопровождения жизненного цикла, в частности в управлении ресурсом каждого конкретного двигателя, была сформулирована одновременно с созданием первого авиационного двигателя. Решение проблемы обеспечивается наличием соответствующих постоянно совершенствующихся регламентирующих документов и специальными службами, ответственными за безопасность эксплуатации, диагностику, ремонт и восстановление авиационной техники. Многие рассматриваемые в рамках развития CALS-технологий вопросы успешно решаются. Однако основной целью, преследуемой в рамках внедрения CALS-технологий, является сокращение стоимости приобретения при повышении надежности изделий. Если ранее принималось во внимание такие параметры эффективности двигателя, как удельный вес, ресурс, экономичность, то переход к глобальной оценке эффективности двигателя с позиции более общей экономической оценки затрат авиакомпания за весь период существования изделия привел к необходимости оценки стоимости приобретения, куда входит стоимость проектирования, изготовления, эксплуатации, ремонтов и утилизации продукции. В связи с этим цель, преследуемая мировыми авиакомпаниями и фирмами – разработчиками двигателей, - сокращение части стоимости приобретения, связанной с сопровождением изделия в процессе эксплуатации, - актуальна и для отечественных организаций, создающих и эксплуатирующих авиадвигатели и стационарные энергетические установки. Снижение части стоимости приобретения, связанной с сопровождением изделия в эксплуатации, зависит от многих факторов: увеличения надежности и экономичности двигателей, снижения стоимости обслуживания и ремонта, увеличения эффективности средств диагностики при одновременном снижении затрат на проведение профилактических и диагностических работах и т.д.

Соответствующие цели преследуются и относительно тех частей стоимости приобретения, которые связаны с проектированием и производством. При этом предполагается по сравнению с традиционными методами сократить не менее чем на 50% время на проектирование, производственные затраты на 15-60%, повысить показатели качества на 80%.

Достижение таких целей возможно за счет революционных преобразований в информационных стратегиях при совершенствовании деятельности в области разнородных процессов на всех стадиях ЖЦ двигателя. При этом должны осуществляться непрерывное управление параметрами ЖЦ (от эскизного проекта до выхода двигателя из эксплуатации) и электронная интеграция предприятий, обеспечивающих процесс управления. Одним из важнейших результатов внедрения CALS-технологий должно стать резкое сокращение объемов информации, которая сейчас многократно дублируется различными службами в процессе работы.

Решения вышеперечисленных задач, несмотря на их грандиозность, на современном этапе развития вычислительной техники и программного обеспечения возможны, однако для каждой рассматриваемой проблемы сами решения и средства их достижения различны.

В целях эффективного применения CALS нам следует использовать не локальную, а интегрированную компьютеризацию при создании научно-технического задела; проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, оценке технического уровня изделия; маркетинге с соответствующим бизнес-планом; проектировании, конструкции, технологической подготовке производства; организации и управлении серийным производством, материально-техническим снабжением; летных испытаниях и исследованиях; сертификации не только российским, но и американским и европейским регистром; эксплуатации, гарантийном и послегарантийном обслуживании, ремонте, устранении неисправностей, модернизации, капитально-восстановительном ремонте, демонтаже и утилизации изделий; непрерывной подготовки кадров конструкторов, технологов, организаторов производства, служб контроля и качества, специалистов маркетинга, сбыта, материально-технического обеспечения, основных поставщиков материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий, нормализованных элементов, крепежа.

ИЭТР – это комплекс данных технической, эксплуатационной, ремонтной документации, предоставленной заказчику в электронной форме на компакт-диске или доступной через Internet (техническое описание изделий и его агрегатов, узлов; технология эксплуатации, обслуживания, ремонта; сведения о диагностике неисправностей и др.)

ИЭТР представляет собой структурированный комплекс взаимосвязанных технических данных, предназначенный для представления в интерактивном режиме справочной и описательной информации об эксплуатационных и ремонтных процедурах изделий. ИЭТР включает в себя базу данных, в которой хранится вся информация об изделии, и электронную систему отображения, предназначенную для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем. Информация в ИЭТР может быть представлена в виде: текста, графических изображений, трехмерных моделей, анимации, аудио- и видеороликов.

Для ускорения внедрения CALS необходимо применение передовых информационных технологий, программных и аппаратных средств, современного технологического оборудования, в том числе за счет модернизации оборудования с ЧПУ на базе персональных компьютеров с встроенными системами контроля геометрии, современных координатно-измерительных комплексов; высокоэффективных конструкционных и функциональных материалов, материаловедческо-технологических и конструкторско-технических решений и др.

Следующим этапом решения проблемы применения CALS является использование международных стандартов и других материалов в области технологий, также необходимо использовать прогнозирование влияние конкретных проектов на:

- научно-технический, производственный потенциал;
- финансовое состояние предприятия (для увеличения производительности, эффективного использования имеющихся ресурсов);
- анализ дебиторской, кредиторской задолженности;
- оптимизацию управления проектом как по временным показателям, так и по затратам;
- подготовку коммерческих предложений для участия в тендерах;
- оптимизацию постоянно меняющихся бизнес-процессов при четком соблюдении требований контрактов с ориентацией на авиализинг.

Еще одной актуальной проблемой является то, что прямое использование CALS-стандартов для внедрения новых информационных технологий – это длительный и непростой процесс, а в настоящее время скорее всего невозможный. Так, из десятков томов одного только стандарта ISO 10303 STEP переведены и утверждены Госстандартом России всего шесть. Для понимания и использования формальных описание процессов и данных, применяемых в этих стандартах, необходима специальная подготовка. Подготовленных по этим вопросам специалистов на предприятиях практически нет, поэтому принципиально важна разработка национальных решений в области CALS-технологий для авиационной промышленности.

Проблему стандартизации данных мы решаем в два этапа:

- 1) Разработка стандартов на представление конструкторско-технологической информации в рамках группы предприятий (корпорации), создание и отработка прикладных систем, работающих с этими данными;
- 2) Разработка средств и систем, работающих с данными на международных стандартах.

На первом этапе должны быть выполнены работы по функциональному и информационному моделированию процессов конструкторской и технологической подготовки производства, описаны и регламентированы процедуры обмена информацией между конструкторским бюро и опытным производством, а также между КБ и серийными заводами. В качестве основы



для проведения анализа должна использоваться действующая нормативно-техническая, конструкторская и технологическая документация. Работа должна завершиться созданием концептуальной схемы данных, представлением функциональной и информационной модели, согласованием структуры базы данных, проектом стандарта на организацию электронного документооборота.

На втором этапе (который может выполняться параллельно с первым) необходимо изучить и апробировать:

- Возможность использования стандарта STEP для создания хранилища данных (Data Warehouse), содержащего полное описание разрабатываемого изделия со всеми версиями и модификациями технологических процессов и производственной среды;

- стандарта P-Lib для создания библиотек компонентов, типовых элементов конструкции, технологических процессов оборудования, инструмента и т.д.;

- стандарта MANDATE для описания производственных данных, включая текущее состояние производственных ресурсов, информационных и материальных производственных потоков.

### **Литература**

1. “CALS” А.Г. Братухин
2. “Информационные технологии в наукоемком машиностроении” А.Г. Братухин
3. “Основы автоматизированного проектирования” Биргер И.А.
4. “Проблемы автоматизации конструирования в машиностроении” Темис Ю.М.

УДК 621.7.014.2; 621.829

## **ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СМАЗОЧНО – ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Петров Юрий Владимирович

*Студент 5 курса*

*кафедра «Технологии машиностроения»*

*Санкт – Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ – ВТУЗ)*

*Научный руководитель: Ю.М. Зубарев,*

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения»*

### **Постановка задачи**

К современным конструкционным материалам, используемым в энергомашиностроении предъявляются высокие эксплуатационные требования. Традиционно используемые конструкционные материалы и материалы триботехнического назначения, в том числе металлы и их сплавы не в состоянии удовлетворить возросшие требования по прочности, износостойкости, долговечности. Товарный рынок предлагает композиционные материалы, на основе термопластов и реактопластов. Преимущества композитов: высокие удельные прочностные и упругие характеристики, стойкость к агрессивным химическим средам, низкие тепло- и электропроводность, хороши триботехнические характеристики (низкий коэффициент трения, высокая износостойкость, способность работать в режиме трения без смазочного материала), а также они экологичны. Все эти свойства позволяют применять их в энергомашиностроении [1]. К подобным материалам относятся композиционные углепластики марок ФУТ и УГЭТ производства ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Спрос на детали из них постоянно растет. Однако вопрос их серийного освоения остается открытым. Причиной ограниченного применения являются сложности достижения заданной точности и качества на операциях финишной обработки. Например, допуски на размеры должны быть выполнены по 6-7 квалитетам, взаимное расположение поверхностей (соосности, радиального биения – до 0,02 мм), микрогеометрии поверхности (шероховатость до 0,4...0,1 мкм по параметру Ra, волнистость до 1500 по параметру Wmax) [11].

Для достижения требуемой точности и показателей качества, уменьшения изнашивания контактирующих поверхностей режущего

инструмента и снижения сил резания при обработке применяют различные СОТС, подаваемые в зону контакта.

Основная цель введения СОТС в зону резания заключается в создании в зоне трения преимущественно жидкостного трения, т.е. скольжение поверхностей трения деталей сопряжения заменяются скольжением жидкости со своими реологическими свойствами. Однако в реальных условиях сплошность плёнки всегда нарушается хотя бы в момент остановки и запуска процесса резания. В этом случае трение переходит в режим граничного. Из работ [3-5] следует, что процесс износа в режиме граничного трения определяется структурой граничного слоя смазки и пластифицированным слоем трущейся поверхности.

По сложившейся классификации трибоузлов в зависимости от условий работы можно выделить следующие их виды:

- низкие нагрузки и низкие температуры (подшипники скольжения, работающие при низких скоростях и малой вибрации);

- умеренные нагрузки и высокие температуры (двигатели внутреннего сгорания; быстроходные малонагруженные зубчатые зацепления с малым коэффициентом проскальзывания);

- высокие нагрузки и низкие температуры (подшипники качения; высоконагруженные зубчатые сцепления с малым коэффициентом проскальзывания);

- высокие нагрузки и высокие температуры (тяжелонагруженные гипоидные передачи и другие узлы трения с большой степенью скольжения; приводящей к интенсивному тепловыделению).

Условия работы СОТС в режиме резания конструкционных материалов относятся к последнему наиболее жесткому режиму с граничным трением [6].

На основании выше приведенного, можно сформулировать решению каких задач для конкретного узла трения должна способствовать модификация СОТС. Так, в условиях гидродинамического режима изменение объемных реологических свойств в сторону увеличения вязкости нежелательно, т.к. это повлечет за собой потерю расходуемой мощности. В то же время желательно изменение реологии в тонком приповерхностном слое для увеличения устойчивости масляной пленки к деформационным изменениям в условиях растущего механического воздействия. Структуризация СОТС позволяет реализовать желаемые реологические режимы. Так, в работе [7] приведены данные о том, что добавка  $10^{14}$ - $10^{15}$  наноразмерных частиц на 1 кг масла привела к следующим эффектам:

- повышение окислительной стабильности масла (смазывающей среды) вследствие прерывания радикально-цепного механизма его окисления на поверхности наночастиц;

- резкое загущение масла при сильном механическом воздействии в зоне трения.

В условиях граничного трения структуризация СОТС наномодификаторами может способствовать решению еще большего числа проблем связанных как с формированием приповерхностной смазочной пленки, так и с пластификацией металлической поверхности трения (режущего инструмента). Оказание активного воздействия на зону трения с помощью наномодификации возможно в силу особых физико-химических свойств наночастиц. Их сорбционная активность способствует равномерному распределению полимера, выполняющего ту или иную роль в СОТС. Например, для антизадирной присадки эта роль состоит в предотвращении мицеллообразования, с одновременным удерживанием в зоне с локальным перегревом, тогда как без наномодификатора происходит десорбция полимера с поверхности металла. Наночастицы характеризуются способностью к диссипации всех видов энергии, выделяющейся в процессе граничного трения в виде фотонов, фононов и экзоелектронов [8]. Последний эффект особенно важен для снижения водородного изнашивания [4], возникающего в результате абсорбции водорода металлом. Одним из источников возникновения атомарного водорода в зоне трения является сольватированные электроны, образующиеся в результате экзоелектронной эмиссии. Время жизни гидратированного электрона имеет порядок миллисекунды, а затем он восстанавливает водород из следов влаги, всегда присутствующей в реальных условиях. Из многочисленного экспериментального материала, приведенного в [3], следует, что абсорбция водорода металлом в триботехнических узлах, содержащих органическую смазку или полимер, представляет основную причину износа.

Таким образом, структуризация СОТС наномодификатором способна не только повысить его антиокислительные свойства, благодаря снижению трибодеструкционных явлений в приповерхностном смазочном слое, но и повлиять на долговечность пластифицированного слоя металла (режущей кромки инструмента). Более того, использование наномодификатора, предварительно обработанного солями металлов (например, меди), вероятно, сможет сформировать сервовитную пленку даже в трибосистемах, не включающих медьсодержащих материалов. Очевидно, что наномодификатор, способный справиться с решением широкого спектра задач, должен обладать набором следующих физико-химических свойств:

- термодинамической устойчивостью,
- высокой сорбционной активностью,
- хорошей (сравнимой с металлами) тепло и электропроводностью.

Наномодификатор с таким набором свойств можно получать на основе фуллероидных материалов [9]. Поэтому целью настоящей работы стало исследование совместного действия в зоне трения наномодификатора (наночастиц, полученных из фуллероидных материалов) и антизадирной присадки на фоне масляной СОТС.

## Постановка эксперимента

Эксперимент включал в себя проведение сравнительных испытаний СОТС трех составов:

- масляная СОТС без добавок;
- масляная СОТС, включавшая антизадирную присадку;
- масляная СОТС, включавшая антизадирную присадку и наномодификатор.

При этом введение антизадирной присадки преследовало как улучшение антизадирных характеристик самой СОТС, так и повышение седиментационно-агрегативной устойчивости наномодификатора.

Наномодификатор, использованный в работе, получен на основе продуктов синтеза фуллеренов плазменно-дуговым методом на установке представленной на рис .1.



Рис. 1. Внешний вид опытной установки для производства фуллерен-содержащей сажи и катодного депозита

На рис. 2а представлен вид углеродного наномодификатора (УНМ), полученный на просвечивающем электронном микроскопе JEM1011 (JEOL, Япония). Материал состоит из полидисперсных многослойных углеродных наночастиц - продукта комплексной обработки депозитов, образующихся при плазменно-дуговом синтезе фуллеренов. Материал имеет следующие характеристики:

- средний размер составляет 50 нм,
- истинная плотность  $2,1\text{г/см}^3$ ,
- насыпная плотность  $< 0,25\text{г/см}^3$ .

Распределение наночастиц УНМ по размеру, определенное в разбавленной водной суспензии УНМ методом динамического светорассеивания на приборе Malvern Zetasizer (Великобритания), представлено на рис. 2б.

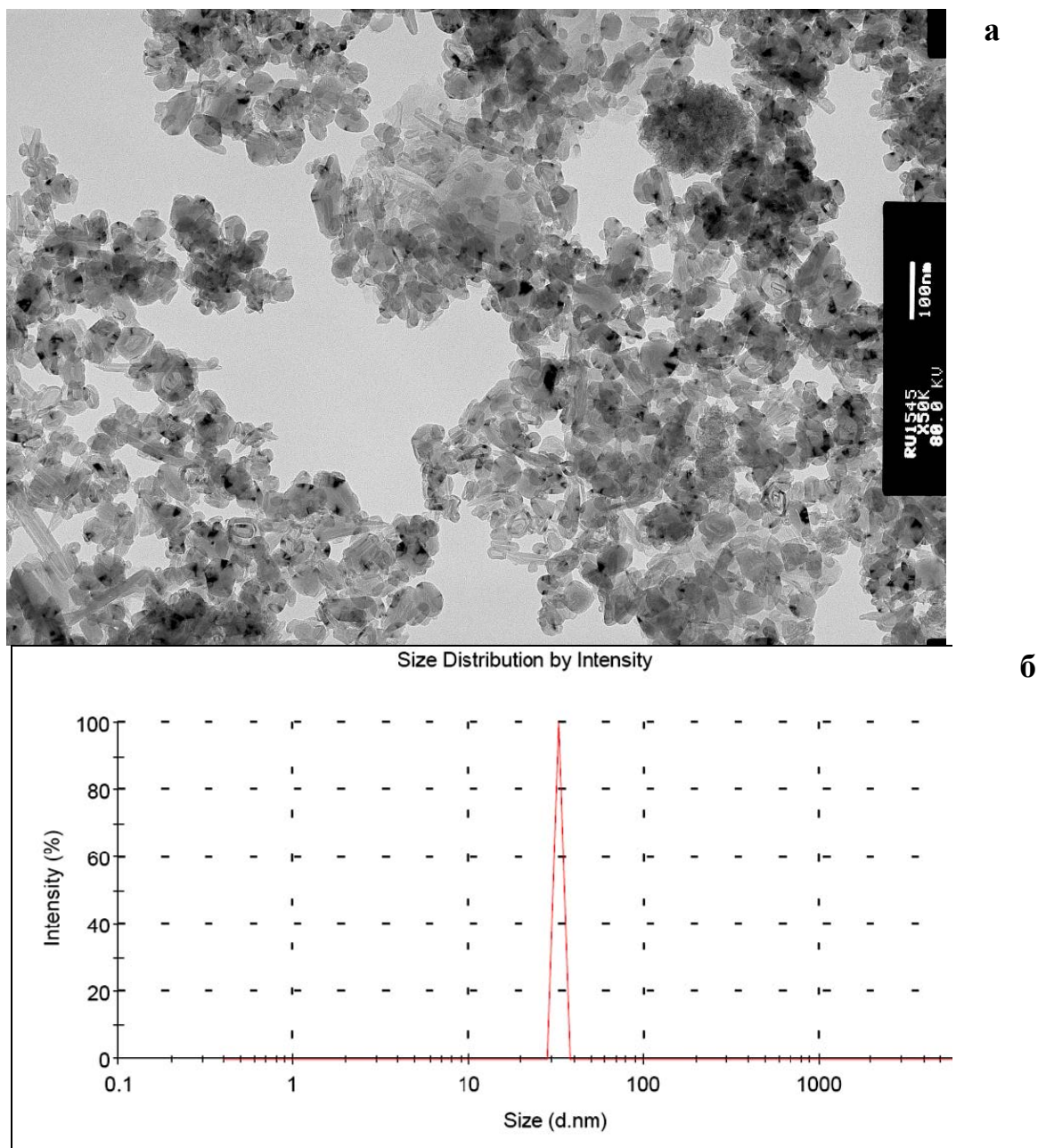


Рис. 2. Микрофотография полидисперсных многослойных углеродные наночастиц (а) и их распределение по размерам (б)

### Проведение эксперимента

В качестве базовой СОТС использовали индустриальное масло И-20А (ГОСТ 20799-88), при этом роль антизадирной присадки выполняла сукцинимидная присадка С-5А.

Для решения задач по получению суспензий УНМ с высокой седиментационной устойчивостью была задействована экспресс-методика центрифугирования СОТС. В дальнейшей работе была выбрана такая концентрация УНМ в масле, которая выдерживала 30-ти минутное центрифугирование на лабораторной центрифуге типа L SZ 48.

Эксперимент можно разделить на несколько этапов. На начальном этапе эксперимента проводились испытания масел *СОТС*: без добавок – масло И-20А (база) *СОТС*; масло И-20А включавшее антизадирную присадку (АП) С5А в разном процентном содержании; масло И-20А включавшее антизадирную присадку С5А в разном процентном содержании и фуллероидный наномодификатор. Результаты трибологических исследований представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Сравнение нагрузки сваривания, критической нагрузки, показателя износа и индекса задира**

Наименование <i>СОТС</i>	Наименование показателя			
	Нагрузка сваривания (Рс), Н	Средний диаметр пятна износа (Ди), мм	Индекс задира (Из)	Критическая нагрузка (Рк), Н
С1(И-20А ГОСТ 20799-88) база	1470	0,327	32,8	657
С2 (И-20А)+у/з*	1646	0,341	36,4	784
С3(И-20А+5%)	2067	0,737	25,0	549
С4(И-20А+2,5%)	2067	0,653	24,7	549
С5(И20-А+1%)	1568	0,338	29,3	735
С6(И20-А+0,5%)	1568	0,319	36,6	784
С7(И20-А+0,25%)	1646	0,331	33,2	823
*- проводились исследования о влиянии ультразвука на <i>СОТС</i> . Применения ультразвуковых приборов является диспергирование. Ультразвуковая кавитация вызывает в жидкости образование потоков, которые разрушают агломераты на отдельные частицы. Результаты исследования о влиянии ультразвука в данной статье не приводятся, но работа ведётся.				

Из табл. 1 видно, что составы с С3 по С4 обладают высокой нагрузочной способностью. При нагрузке Рс = 2067 Н в обоих испытаниях происходит сваривание, это видно из табл. 2. Если говорить про другие показатели, то видна определённая закономерность – индекс задира увеличивается с уменьшением содержания антизадирного препарата, тоже происходит и с критической нагрузкой. Это можно объяснить тем, что при большей процентном содержании (АП), препарат препятствует появлению задира, но резко увеличивается износ.

Таблица 2. Определение нагрузки сваривания (Pс), составов СЗ-С4

№ п/ п	Нагрузка		Диаметр пятен износа, мм	Средний диаметр пятна износа, мм	Нагрузка сваривания Н (кгс)
	Н	кгс			
1	1568	160	2,957 2,739 2,573	2,756	-
2	1960	200	3,622 3,584 3,584	3,597	-
3	2067	211	сваривание	-	2067(211)
4	2067	211	сваривание	-	-
5	2195	224	сваривание	-	-
6	2450	250	сваривание	-	-

Как было сказано ранее, третий этап эксперимента включал проведение сравнительных испытаний СОТС, включавшее антизадирную присадку и наномодификатор. Эти составы получили условные обозначения С9 и С8. При проведении испытаний для определения показателя износа (материала шариков – сталь ШХ-15 по ГОСТ, время – 1ч, нагрузка – 196 Н), на машине трения (ЧМТ) измеряли усреднённую температуру смазочного материала в зоне трения ( диаграмма см. рис.3).

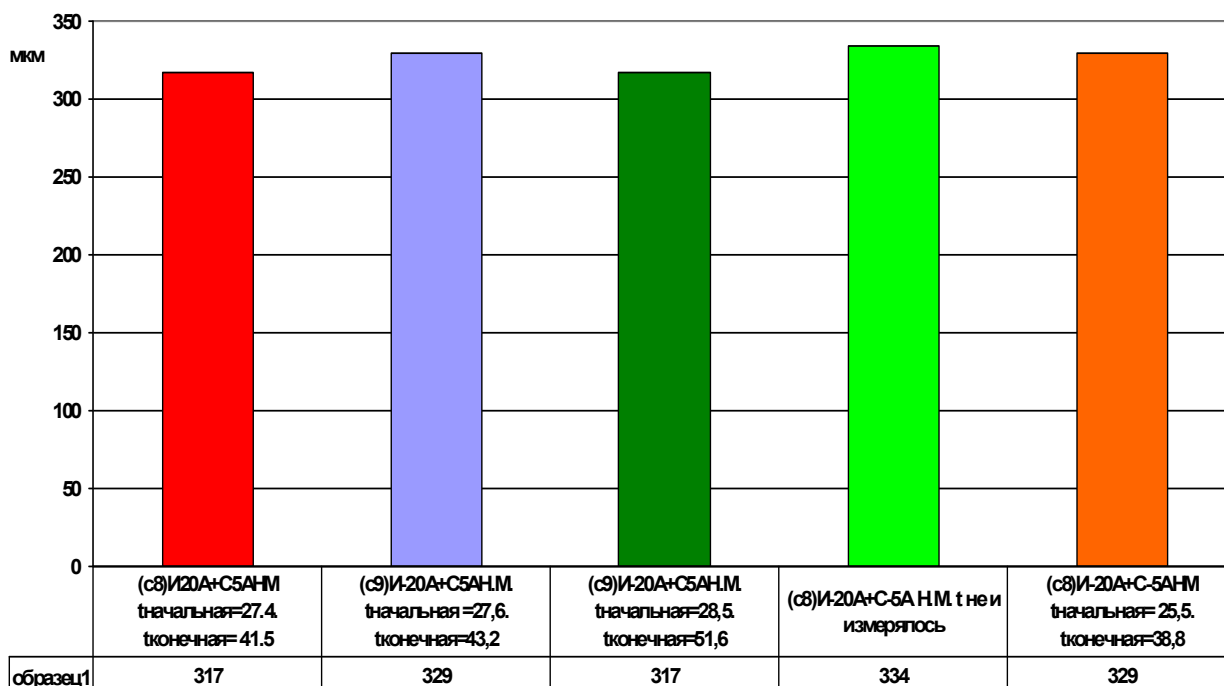


Рис.3. Сравнительные данные значений износа образцов из стали ШХ-15 в испытуемом смазочном материале И-20А с антизадирной присадкой и наномодификатором С-5А УНМ (С9 и С8) (температура в °С)



Изменение температуры колеблется не существенно. В ходе эксперимента проводилась не однократные замеры температуры смазочного материала в зоне трения с точностью до 0,1 °С. Усреднённая температура в °С приведена на рис.3.

Натурные испытания проводились на операции шлифования внутреннего отверстия Ø10 мм глубиной 15 мм шлифовальным кругом АС15 при скорости резания  $V = 35$  м/с в заготовках из композиционного углепластика марок ФУТ и УГЭТ [11]. Данные испытаний, до момента потери режущей способности кругом представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Результаты испытаний модифицированных СОТС на операции шлифования**

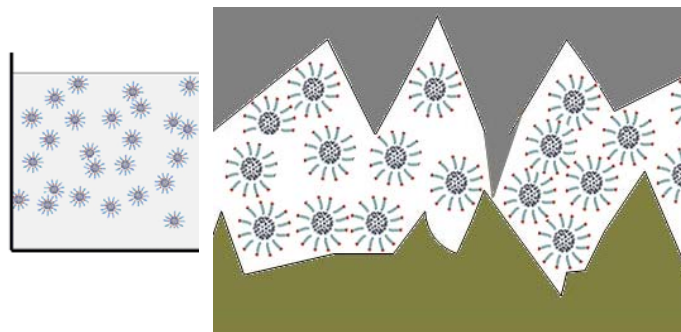
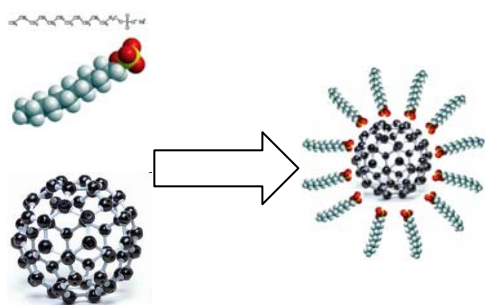
№ п/п	Обозначение исследуемой СОТС	Стойкость (количество заготовок), шт	Доверительный Интервал при вероятности (0,95 + /- X), шт	Примечание (обрабатываемый материал)
1	СОТС база И-20А	93	10	УГЭТ
2	СОТС С-5А УНМ	123	8	УГЭТ
3	СОТС база И-20А	57	9	ФУТ
4	СОТС С-5А УНМ	105	6	ФУТ

### Обсуждение результатов

Как следует из опытных данных, введение антизадириной присадки существенно меняет качество трущейся поверхности. Это связано с хорошо известной способностью поверхностно-активных веществ (ПАВ) снижать время приработки в новом трибосопряжении и формировать в нем защитный расклинивающий слой [12]. Однако с ростом нагрузки работоспособность ПАВ резко падает в результате его десорбции с трущихся поверхностей и возможной деструкции.

На основании полученных данных испытаний, известных свойств УНМ и ПАВ, к которым относится антизадириная присадка С-5А, возможно представить механизм, действия наноструктурированного СОТС, который постадийно отражен на рис. 4.

**молекула  
полимера**



**наночасти  
ца**

**а**

**б**

**в**

Рис. 4. Постадийный механизм наноструктуризации СОТС: а) формирование сольватной оболочки из полимера; б) возникновение фрактальной сетки в объеме СОТС в) микрорельеф трибопары в присутствии наноструктурированной СОТС

Как видно из схемы на рис. 4, УНМ на стадии диспергирования в базовом масле формирует вокруг себя сольватную оболочку из его молекул. Это диспергирование происходит в присутствии антизадирной присадки, которая в данном случае играет роль ПАВ.

Благодаря сорбции на УНМ, молекулы ПАВ приобретают ориентацию наиболее благоприятную для последующего их взаимодействия в зоне контакта с трущимися поверхностями, снимая тем самым ориентационный фактор. В свою очередь, наличие сольватной оболочки у наночастиц УНМ придает им седиментационно-агрегативную устойчивость, что является необходимым условием для формирования объемной фрактальной сетки в жидкой среде СОТС.

Таким образом, благодаря более эффективной работе антизадирной присадки и наличию фрактальной сетки УНМ способствующей диссипации энергии из зоны локальных перегревов, наноструктурированная смазочная среда приобретает способность противостоять большим нагрузкам без задира в узлах трения.

## Литература

1. *Абозин И.Ю., Петров В.М.* Некоторые вопросы механической лезвийной обработки углепластиков // Вопросы материаловедения. №2(26) 2001, – С. 86-93.
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка) \Под ред. Чичинадзе\ М.: Центр «Наука техника», 2001. – 778 с.
3. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. М.: 1963.- 472 с.
4. *Гаркунов Д.Н.* Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов. М.: Изд. МСХА, 2004.- 383 с.
5. *Поляков С.А., Хазов С.П.* Нанотехника в трибологии // Нанотехника-2006. № 1. - С. 42-56.
6. *Курчик Н.Н., Вайниток В.В., Шехтер Ю.Н.* Смазочные материалы для обработки металлов резанием. М.: Химия, 1972. – 312 с.
7. *Абрамян А.А., Балабанов В.И., Беклемышев В.И., Вартанов В.И., Махонин И.И., Солодовников В.А.* Основы прикладной нанотехнологии М.: Изд. дом МАГИСТР-ПРЕСС 2007. - 197с.
8. *Евдокимов В.Д., Семов Ю.И.* Экзоэлектронная эмиссия при трении. М.: Наука, 1973. - 180 с.
9. *Раков Э.Г.* Нанотрубки и фуллерены. М.: Университетская книга, Логос, 2006.- 376 с.
10. *Васильков Д.В., Петров В.М.* Контроль состояния поверхностного слоя конструкционных материалов // Инструмент. 1996, № 2. - С. 28–29.
11. *Зубарев Ю. М., Петров В.М., Петров Ю.В.* Особенности механической обработки алмазным абразивным инструментом композиционных углепластиков применяемых в энергетическом машиностроении.// Материалы Всероссийской научно-технической конференции.- Рыбинск: Р Г А Т А, 2009.Ч.1. – С. 18-23
12. *Ланге К.Р.* Поверхно-активные вещества: синтез свойства анализ применения. СПб.: Изд. Профессия, 2005. – 219с.

УДК 621.01

## ОСОБЕННОСТИ ОБМЕРА ПЛОСКОЙ ДЕТАЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЦИФРОВОЙ ФОТОСЪЁМКИ

Потапова Анастасия Игоревна<sup>(1)</sup>

*Студентка 3 курса<sup>(1)</sup>, кафедра МТ-3,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научные руководители:*

*Вуколов А.Ю., ассистент кафедры РК-2*

*Головин А.А., д.т.н., профессор кафедры РК-2*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

### Введение

Одним из актуальных направлений экспериментальных методов теории механизмов является бесконтактное измерение объектов промышленной механики. К ним относятся методы цифровой фотосъёмки с последующей обработкой полученных результатов. Наиболее используемыми методами данного направления принято считать:

- «Техническое зрение», основанное на отслеживании реперных точек. Метод состоит в измерении расстояния между оптическими реперами, закрепленными на исследуемом объекте, и/или контрастными границами в измеряемой области. Использование этого технического метода для бесконтактного обмера объектов промышленной механики описано в работах [1, 2];

- «Техническое зрение», основанное на определении фактического масштаба изображения. Метод состоит в использовании параметров фокусировки оптики и/или известных размеров эталонных объектов в рабочем поле. Данный метод следует признать наиболее предпочтительным для применения в робототехнике по причине высокого уровня развития технологий цифровой фотографии.

Данная исследование является расширением работы [2], в которой на основе цифровой фотосъёмки были получены размеры кулачкового механизма и на основе гипотезы о законе движения толкателя кулачкового механизма восстановлен исходный профиль кулачка. Кроме того, было показано, что малое рассогласование оптической оси фотоаппарата и оси вращения кулачка, фактически не влияет на результаты измерений.

К недостаткам работы [2] относятся следующие:

- При фотосъёмке не были учтены факторы, связанные с теневым эффектом;

- Получение фактического масштаба без применения эталона, то есть с пониженной точностью.

В данной работе предлагается метод бесконтактного измерения объектов промышленной механики с помощью цифровой фотосъемки, с учётом всех несовершенств. При фотосъемке использована аппаратура среднего класса, позволяющая получать результаты необходимой точности с минимумом затрат.

### **Планирование эксперимента. Постановка задачи экспериментального исследования**

В качестве объекта исследований был выбран кулачковый механизм гибочного пресс-автомата (рис. 1). Съёмка проводилась на цифровую фотокамеру Canon EOS 400D DIGITAL с выдержкой 8 с и фокусным расстоянием оптики 50 мм. Разрешение регистрирующей матрицы составляет 10.5 МПикс. Средняя розничная цена данной камеры составляет 500 евро.

Особенности фотосъемки:

- Малое угловое отклонение оптической оси фотоаппарата от параллельности оси вращения кулачка фактически не влияет на результаты измерений [2];
- Наличие теневого эффекта (затененных участков профиля кулачка);
- Необходимость точного определения начала координат. В данном случае – точного определения проекции оси вращения кулачка на снимок;
- Особенности вычисления размеров, связанные с формой пикселя и дискретностью цифрового фотоизображения – появление дробных размеров в пикселях (рис. 2).

Фотосъемка проводилась в помещении с естественным рассеянным светом, без использования дополнительных осветительных приборов. Во время фотосъемки на исследуемый механизм крепился эталон длины (стандартная концевая мера), основной размер которого составляет 30мм.

Основные задачи экспериментального исследования состояли в следующем:

1. Получить по имеющимся фотоснимкам с максимальной возможной точностью конструктивный профиль кулачка в виде развертки, либо контура;
2. Оценить величины возникающих ошибок и предложить эффективные методики их компенсации;
3. Определить по геометрическим характеристикам кулачка закон движения толкателя.

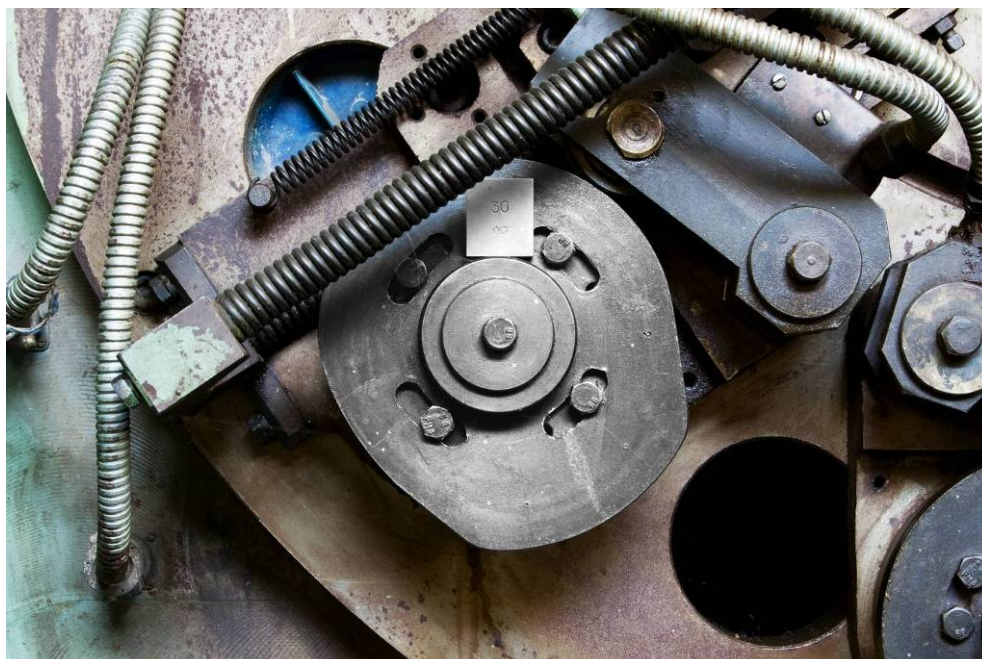


Рис. 1. Кулачковый механизм гибочного пресс-автомата

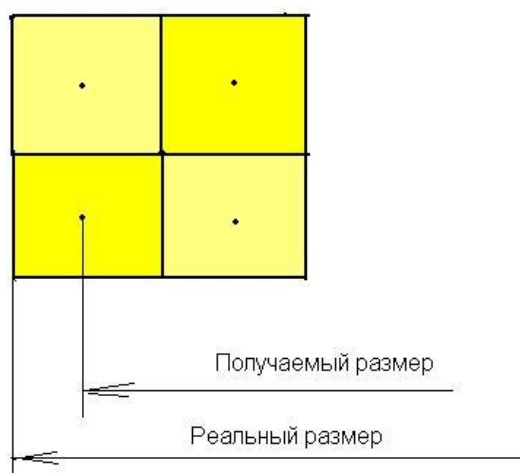


Рис. 2. Искажение измеряемой геометрии за счет дискретности цифрового фотоизображения

Общее число фотографий, полученных во время эксперимента – 8, обработке подвергались 3 наиболее четких снимка.

### Методика обработки результатов эксперимента

Обработка полученных фотоснимков проводилась в программах Canon CameraRAW2 Conversion и Adobe Photoshop CS4. Последовательность обработки указана ниже:

1. Выделение на фотоснимке полос пикселей (Scan Lines) и замер по контрасту длины их участков, соответствующих изображению кулачка или эталона длины (рис. 3);

2. Определение фактического масштаба изображения по эталону длины;
3. Статистическая обработка полученных результатов, определение доверительного интервала для величины фактического масштаба;
4. Определение центральной точки кулачка;
5. Получение фактического профиля кулачка;
6. Оценка и компенсация ошибок;
7. Определение доверительного интервала измерений на основе t-критерия [3].

Результаты определения фактического масштаба по эталону длины представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты определения фактического масштаба изображения**

<b>Количество групп пикселей</b>	14	
<b>Выборочное среднее</b>	Пиксел	264.054
<b>Стандартное отклонение</b>	Пиксел	0.4302
<b>Оценочная величина ошибки</b>	Пиксел	0.1145
<b>Коэффициент Стьюдента</b>	2.1604 (для доверительной вероятности 95%)	
<b>Фактический масштаб</b>	<b>Пикс/мм</b>	<b>8.80175</b>
<b>Ширина доверительного интервала (по изображению)</b>	Пиксел	0.4947
<b>Ширина доверительного интервала (по длине)</b>	мм	0.0562

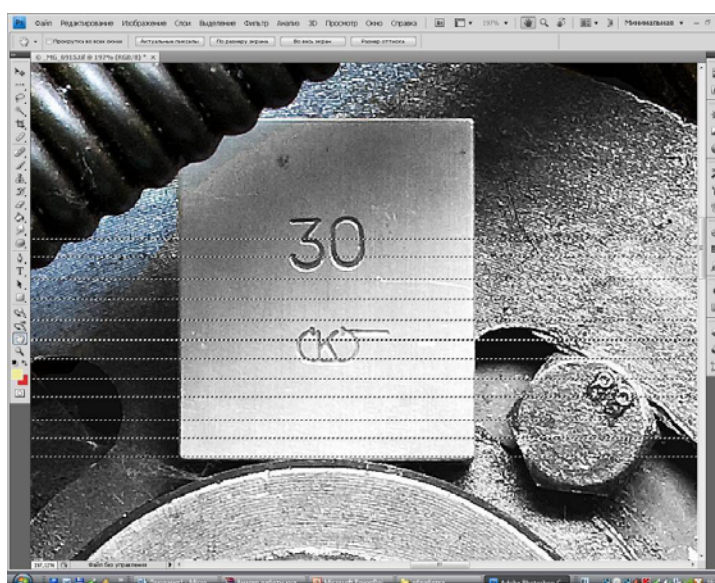


Рис. 3. К определению фактического масштаба

Центровая точка профиля кулачка определена по косвенным признакам (положению высокоточного крепящего болта в центре кулачка) в следующей последовательности:

1. Изображение головки шестигранного болта (см. рис.1) увеличивается до масштаба 100%;
2. В Adobe Photoshop CS4 восстанавливается её профиль – правильный шестигранник;
3. Вершины шестигранника соединяются прямыми крест-накрест;
4. Точка пересечения полученных прямых – центровая точка профиля кулачка с достаточно высокой (максимальное возможное отклонение не более 0.08 мм) точностью;
5. Реальное положение центральной точки, определенное на данном этапе, в дальнейшем проверяется построением центральной точки малой окружности кулачка методом хорд. Проверка показала приемлемую точность.

Для восстановления профиля кулачкового механизма используются полярные координаты. Измерения профиля проводятся многократно, дробные (по пикселям) координаты положения контрастной границы изображения кулачка на снимке – определяются триангуляцией. Каждому последующему результату соответствовал поворот кулака на 5 градусов по часовой стрелке.

В результате получен массив, в котором каждому углу поворота в градусах соответствует радиус кулачка, определённый в пикселях. Для каждого измеряемого положения по ранее полученному фактическому масштабу определена величина этого радиуса.

В табл. 2 приведён фрагмент результатов измерений, содержащий значение профильного угла, соответствующее ему значение длины радиуса, определенное в Adobe Photoshop CS4, математическое ожидание радиус-вектора, по которому возможно восстановить с высокой точностью конструктивный профиль.

Плотность распределения измеряемой величины определяется зависимостью [3]:

$$f_X(x) = \frac{1}{b-a} \mathbf{1}_{[a,b]}(x)$$

для распределения Гаусса, выбранного в качестве стандартной модели. В этом случае математическое ожидание определяется по формуле:

$$M[X] = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = \frac{a+b}{2}$$

Развертка полученного конструктивного профиля представлена на рис. 4.



Таблица 2. Фрагмент результатов измерений

№	Угол поворота	Пиксели	Min, мм	Max, мм	Математическое ожидание, мм
1.	0	721.68	81.916	82.0697	81.9928
2.	5	719.78	81.70	81.85	81.775
3.	10	714.77	81.13	81.28	81.205
4.	15	709.66	80.551	80.702	80.6265
5.	20	705.79	80.112	80.262	80.187
6.	25	700.75	79.54	79.689	79.6145
7.	30	700.08	79.464	79.613	79.5385
...	...	...	...	...	...
68.	335	719.86	81.70	81.936	81.818
69.	340	721.76	81.915	82.152	82.0335
70.	345	722.38	81.985	82.223	82.104
71.	350	720.48	81.779	82.001	81.89
72.	355	720.48	81.779	82.001	81.89
73.	360	721.15	81.846	82.083	81.9645

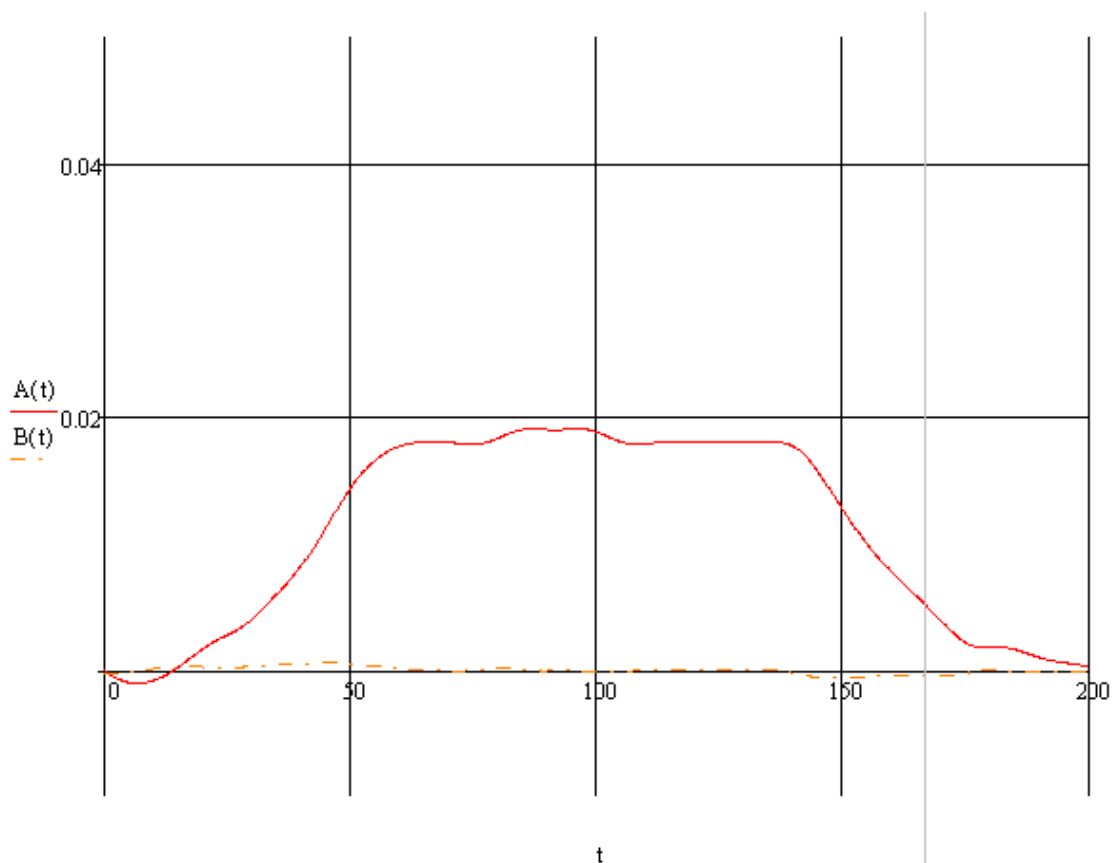


Рис. 4. Развертка конструктивного профиля кулачка

### Ошибки и методика их компенсации

Большинство возникающих в процессе измерения ошибок относятся к аппаратным шумам, ошибкам предварительной обработки изображения и т.п. Методика компенсации таких ошибок описана в работах [1, 4].

#### *Теневого эффект*

Съёмка проводилась при естественном освещении, без использования каких-либо дополнительных источников освещения. Это привело к искажению размеров в нескольких затененных областях снимка – так называемому теневому эффекту.

Как можно видеть на рис. 5 – существует несколько зон, где края кулачка практически неразличимы. Кроме того, затененные участки из-за эффекта паразитного отражения создают двойные и малоcontrastные «воображаемые края» на профиле, создавая, таким образом, большое различие между реальной длиной радиуса кулачка и той же величиной, измеряемой в данном положении. Например, на рис. 1 минимальное различие составляет примерно 0.7 мм (6.15 пиксел). Для компенсации этой погрешности принято следующее решение: участки профиля, расположенные в зоне теневого эффекта, принимаются за участки, лежащие на малом образующем круге кулачка. В случае, когда подобная компенсация невозможна, реальный радиус определяется из предположения об изначальной геометрии профиля кулачка.



Рис. 5. Зоны теневого эффекта

### ***Ошибки дискретизации***

Данные ошибки возникают при рассмотрении формы единичного пиксела. Пиксел представляет собой неделимый объект, обычно квадратной или круглой (при печати на твердом носителе) формы, обладающий определённым цветом. Цифровое фотоизображение состоит из строго квадратных пикселов, расположенных по строкам и столбцам. В случае цифрового видеоизображения форма пиксела искажается при преобразовании формы экрана, что требует специальной методики обработки [4].

Граница измеряемой детали состоит из пикселов. При проведении измерения, возможно, что один или несколько пикселов выпадают из измерения по причине малого контраста [1] (рис. 6).

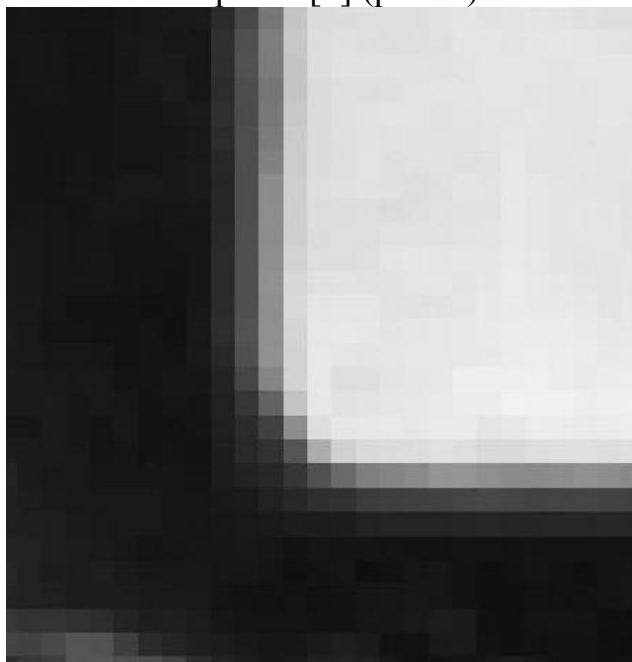


Рис. 6. Возникновение ошибок дискретизации

Результатом компенсации ошибок дискретизации является выражение размеров в пикселах дробными числами, как описано выше.

### **Результаты обработки данных. Закон движения толкателя**

На рис. 7 представлен конструктивный профиль кулачка, построенный с помощью комплекта параметрических средств САПР. О величине доверительного интервала дает представление табл. 2. На рис. 8 показаны графики перемещения и скорости (первой производной перемещения) толкателя, дающие представление о законе движения.

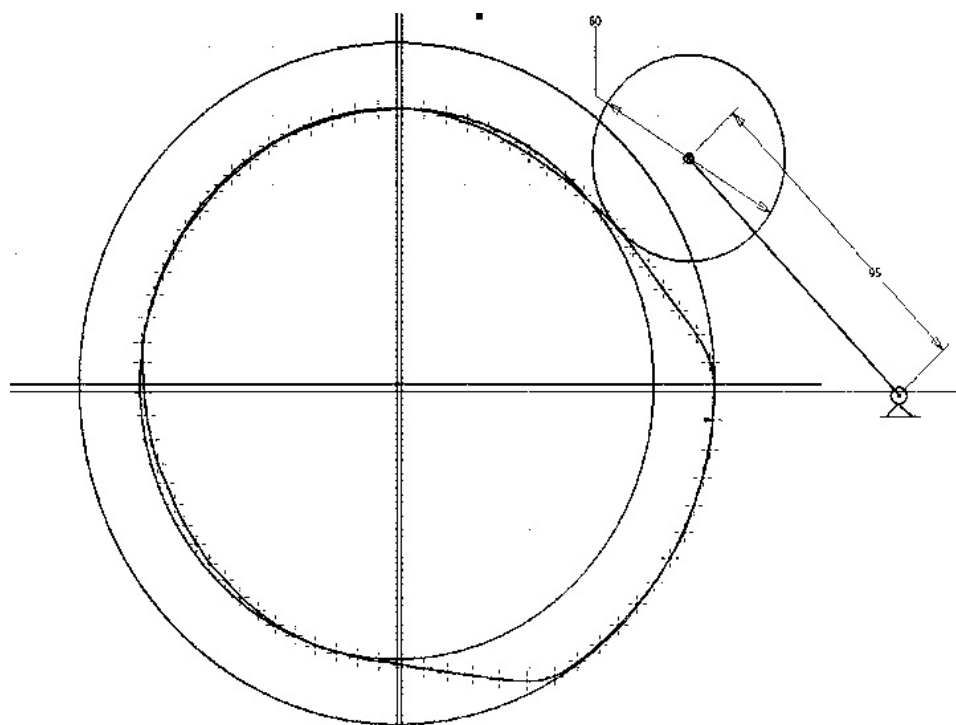


Рис. 7. Конструктивный профиль кулачка

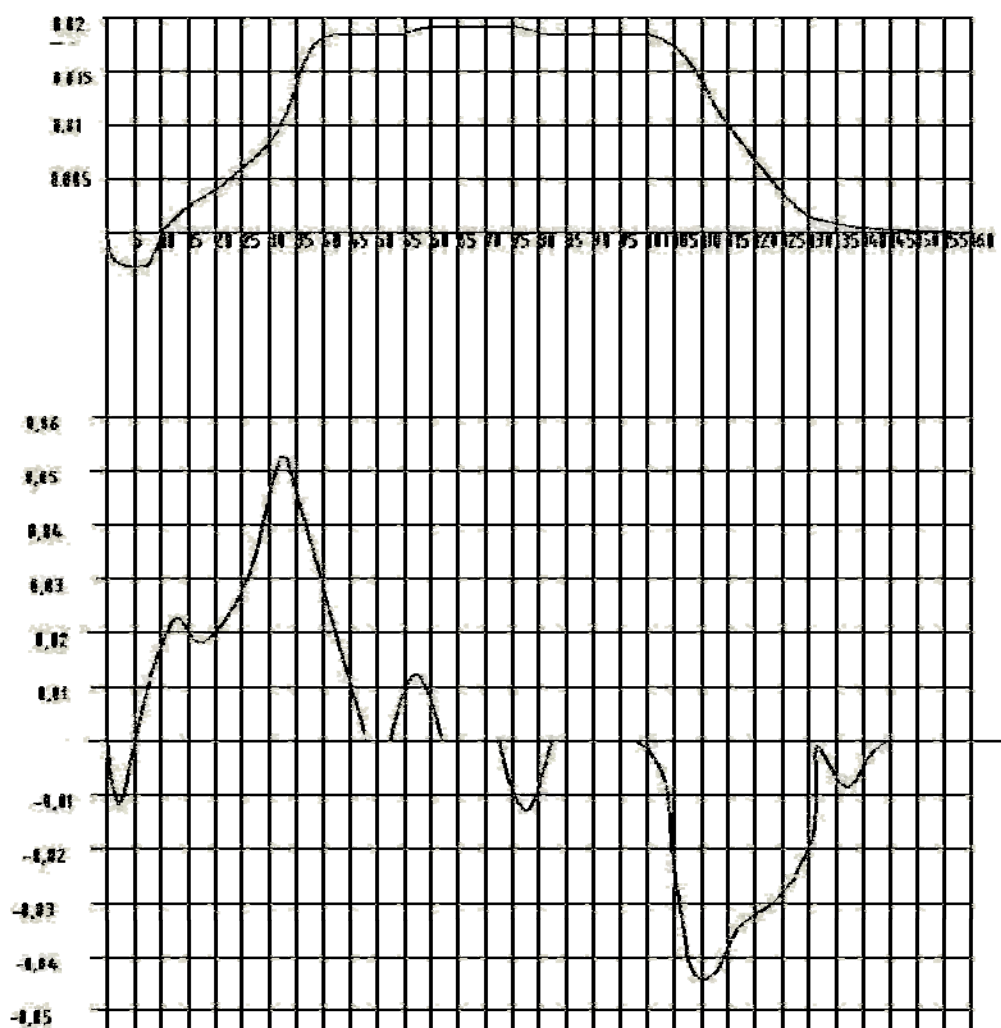


Рис. 8. Закон движения толкателя

### Выводы

1. Показана возможность использования цифровой фотоаппаратуры для бесконтактного обмера объектов промышленной механики;
2. Предложена методика быстрого и эффективного определения фактического масштаба с компенсацией ошибок по внешнему эталону;
3. Описанные методики опробованы на реальной системе, показана их применимость и приемлемая точность;
4. Существуют перспективы применения описанных методов для удаленной, в том числе автоматизированной, диагностики реальных устройств промышленной механики.

### Литература

1. *A. Vukolov, A. Golovin, N. Umnov.* Horse Gait Exploration on “Step” Allure by Results of High Speed Strobelight Photography. Proceedings of EuCoMeS-2010 Conference.
2. *A. Golovin, A. Lafitsky, A. Simuskhin.* Experimental And Theoretical Research Of Cams Wearing Of Cams Mechanism. Proceeding of 2nd International Conference EuCoMeS-2008 /Edited by Marco Ceccarelli. – Springer. – 2008. – Pp. 107-119.
3. *В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.* Математическая статистика. Учебник для ВУЗов. Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. ISBN 5-7038-1270-4 М. – Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
4. *A. Vukolov, A. Kharitonov.* Kinematical Analysis of Mechanical Systems by Results of Digital Video Recording. Proceeding of The 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines SYROM 2009/Edited by Ion Visa. – Springer. – 2009. Pp. 457-464.

## УДК 658.512.4

# СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ САПР ТП СБОРКИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Умаров Герман Шавкатович

*Студент 5 курса  
кафедра «Технология машиностроения»  
МГТУ им.Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: Ю.А.Островский,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»*

На сегодняшний день разработки в области САПР ТП сборки сильно разрознены, отсутствует наиболее приближенная к реальным требованиям концепция системы в целом.

Для выполнения предъявленных требований необходимо выявить конкретные задачи и подзадачи.

В настоящее время к САПР ТП (системам автоматизированного проектирования технологических процессов) сборки предъявляют следующие требования ([3], стр.93):

- 1) Выбор метода достижения заданной точности сборки;
- 2) Декомпозиция изделия (сборочной единицы) в соответствии с их технологической структурой;
- 3) Выбор базовых деталей для узловой и общей сборки;
- 4) Выделение в конструкции размерных цепей, их расчет по методикам, задаваемым пользователем, интерпретирование результатов расчета;
- 5) Формирование собственно ТП сборки, его маршрутно-операционного изложения, техническое нормирование;
- 6) Выбор и оптимизация вариантов ТП сборки в соответствии с заданными критериями (целевыми функциями);
- 7) Оформление технологической документации на спроектированный ТП.

Данные требования можно уточнить и дополнить:

- 1) Так, метод достижения заданной точности сборки задается конструктором, а технолог лишь проверяет выбранный метод и в случае невозможности использования предложенного метода предлагает конструктору свой вариант или утверждает невозможность выбранного. К тому же для различных узлов и соединений могут быть различные методы; Данный пункт можно назвать - *проверка выбранных методов достижения заданной точности сборки;*

2) Декомпозицию можно дополнить предварительной оценкой ТП сборки – как по времени, так и по требуемому оборудованию; *Декомпозиция изделия (сборочной единицы) в соответствии с его технологической структурой. Предварительная оценка ТП сборки;*

3) Без изменений;

4) Методики расчета необходимо унифицировать, например основываясь на работах профессора Базрова Б.М. в этой области [2]. Участие пользователя при этом не требуется. К тому же данный пункт тесно связан с первым пунктом, 1 и 3 можно объединить. *Выделение в конструкции размерных цепей, интерпретирование результатов расчета и проверка выбранных методов достижения заданной точности сборки;*

5) Оставшиеся пункты не требуют уточнений.

Уточненный список требований:

1) Выделение в конструкции размерных цепей, интерпретирование результатов расчета и проверка выбранных методов достижения заданной точности сборки;

2) Декомпозиция изделия (сборочной единицы) в соответствии с его технологической структурой. Предварительная оценка ТП сборки;

3) Выбор базовых деталей для узловой и общей сборки;

4) Формирование собственно ТП сборки, его маршрутно-операционного изложения, техническое нормирование;

5) Выбор и оптимизация вариантов ТП сборки в соответствии с заданными критериями (целевыми функциями);

6) Оформление технологической документации на спроектированный ТП.

Для полноценной работы системы необходима ГТМИ (геометро-технологическая модель изделия). Однако проблемой остается то, что современные конструкторские САПР не создают полноценных ГТМИ. Создание полноценной ГТМИ (путем корректировки и дополнения) можно возложить на пользователя или же автоматизировать (извлекать в автоматическом режиме технологические данные из модели изделия). Самой главной и общей задачей является представление ГТМИ в виде *математической модели*. Данная задача имеет решение в виде представления изделия графом, узлы которого образуются совокупностью МП (модуль поверхностей), а ребра – МС (модуль соединения), см. [1]. Соответствующей подзадачей является декомпозиция изделия на МП и МС, установление связей между ними и непосредственно построение графа изделия. Таким образом система САПР будет иметь возможность опознавать изделие и детали как взаимодействующие объекты, а не как совершенно обезличенные тела.

На основании вышеизложенного, предлагается следующий способ построения САПР ТП сборки (в порядке следования модулей, см. рис.1,2 - схемы на IDEF0).

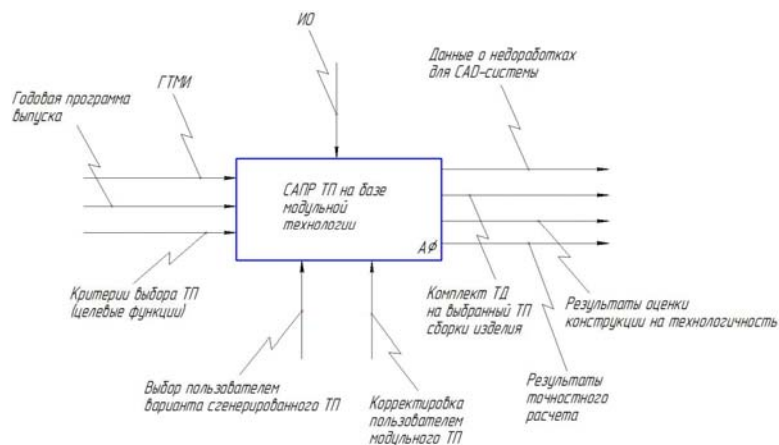


Рис.1. Структура системы САПР ТП сборки

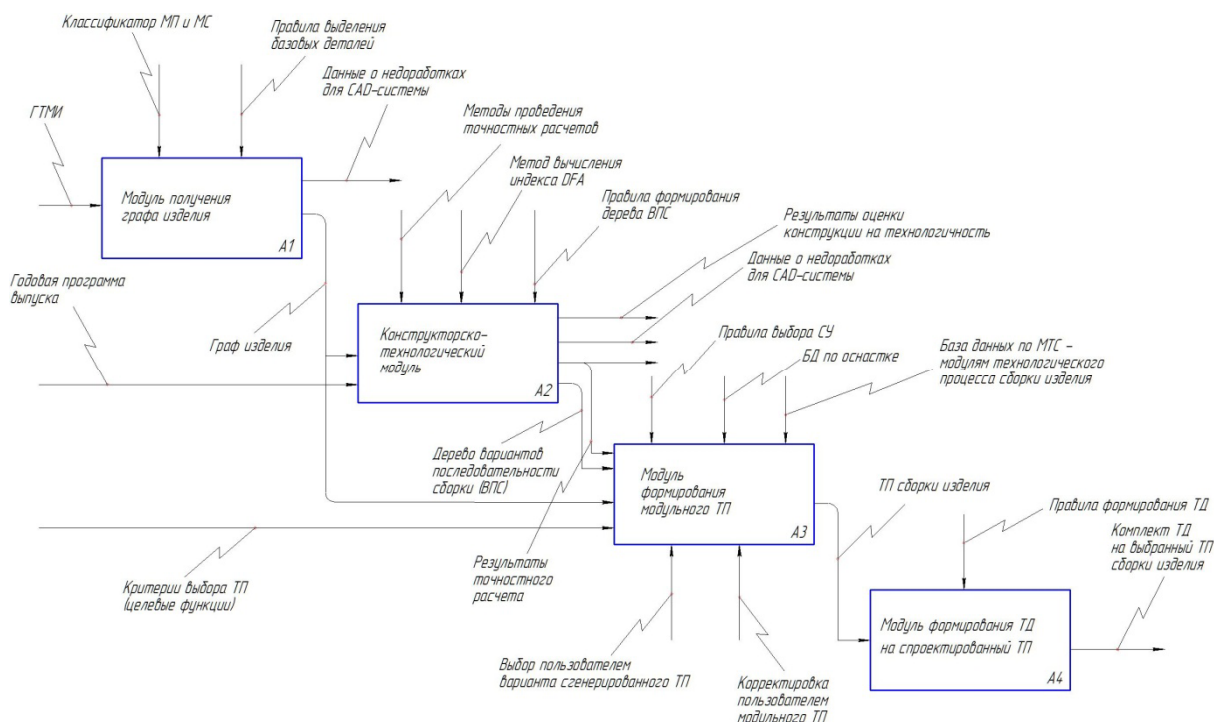


Рис.2. Структура системы САПР ТП сборки (продолжение)

### А1. Модуль получения графа изделия

В данном модуле осуществляется автоматизированная генерация графа изделия, образованного совокупностью МПБ (МП базирующие) деталей и связями между ними (рис.3).



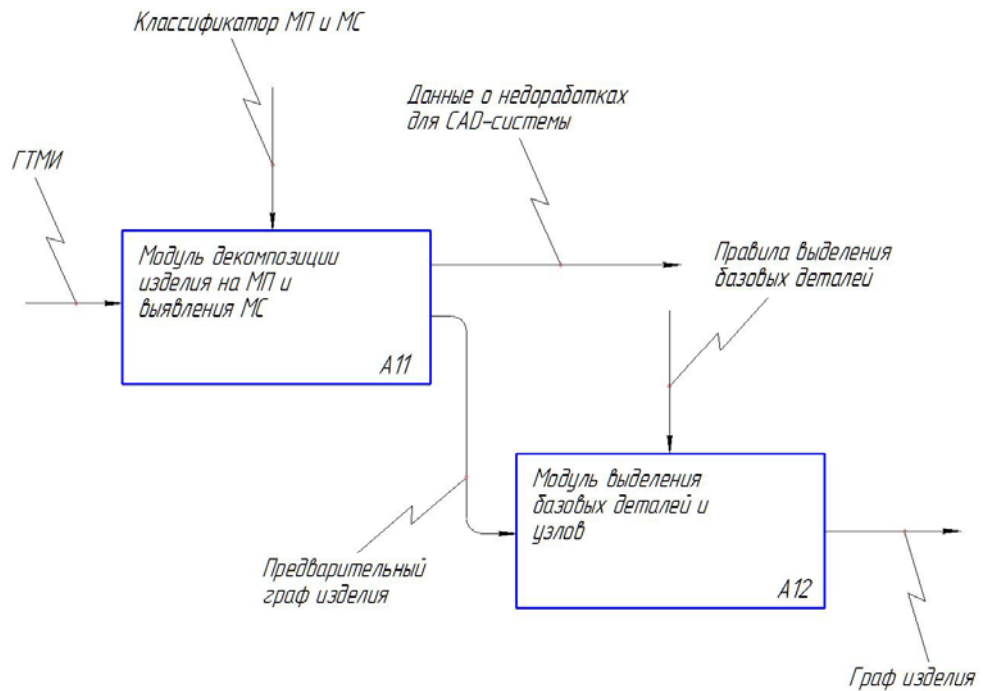


Рис.3. Модуль получения графа изделия А1

**А11. Модуль декомпозиции изделия на МП и выявления МС** требует алгоритма выделения и распознавания в деталях МП и МС. На основании того, что МП и МС обладают вполне однозначными свойствами в отношении состава поверхностей их образующих, предлагается следующий алгоритм выделения и распознавания в деталях МПБ (выделять МПС – МП связующие и МПР – МП рабочие нет необходимости т.к. они не участвуют непосредственно в формировании модуля соединения) и МС (рис.4).

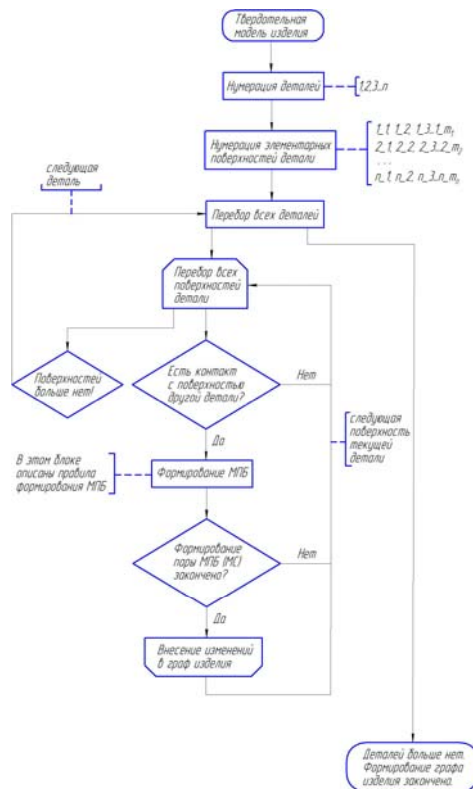


Рис.4. Алгоритм распознавания в деталях МПБ и МС

Обозначения на рис.1. –  $n$  – количество деталей в изделии,  $mp$  – количество элементарных поверхностей в  $n$ -ой детали. *Правила формирования МПБ* основаны на классификации МП (см. [1]), а именно на однозначности состава поверхностей их образующих.

Рассмотрим действие алгоритма на конкретном примере (анализируемое изделие – обратный клапан).

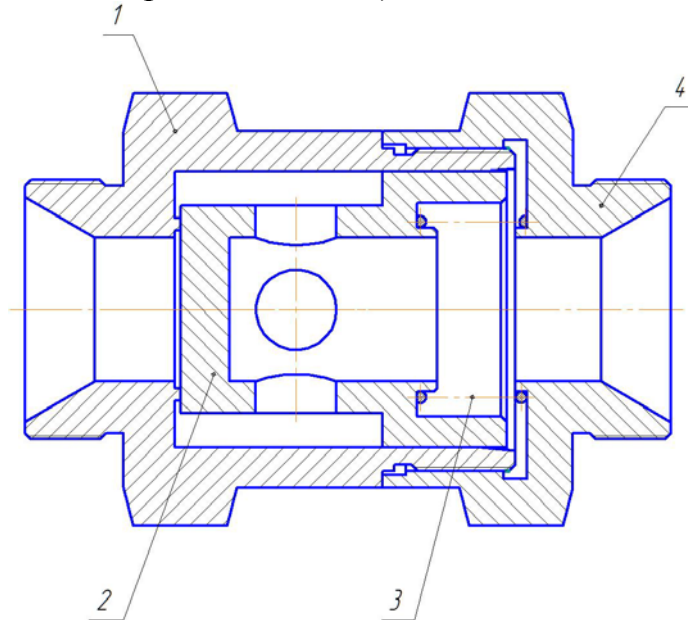


Рис.5. Обратный клапан

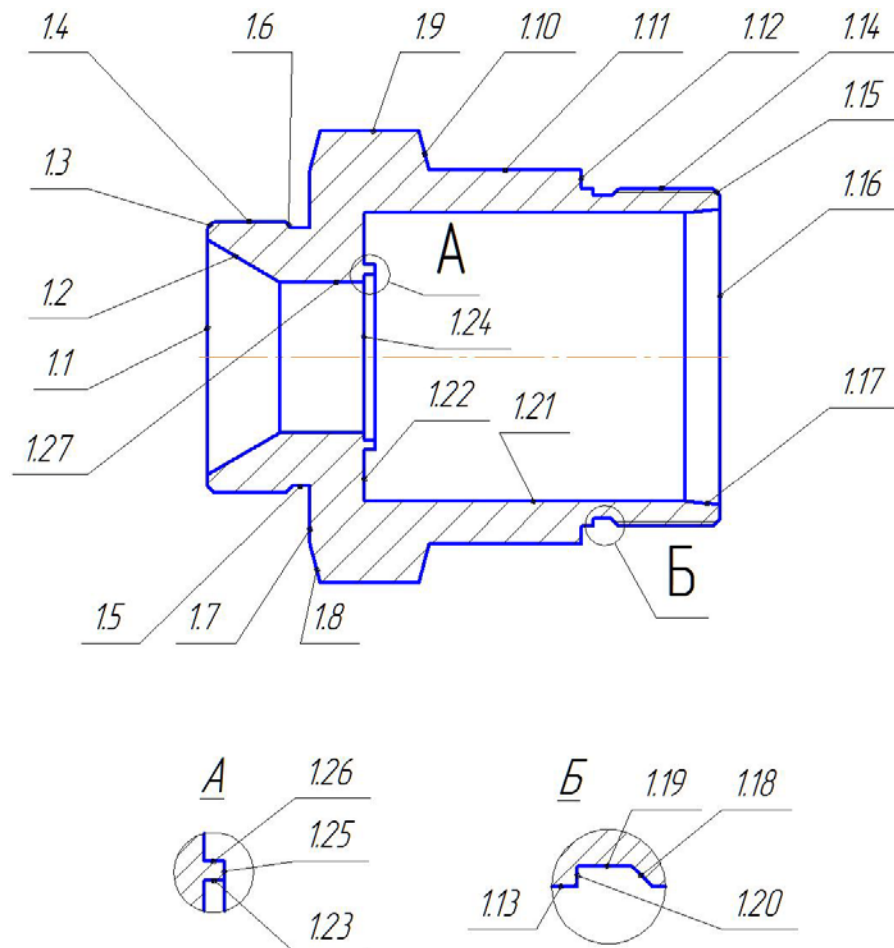


Рис. 6. Нумерация элементарных поверхностей детали 1  
1.2.МПБ212

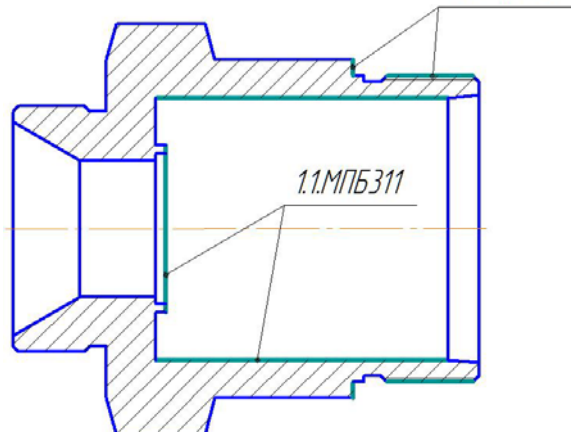


Рис. 7. Выявленные МПБ детали 1

Таким образом в процессе анализа детали 1 были выявлены два МПБ и образующие их поверхности. Аналогично проводится анализ других деталей, входящих в изделие. В процессе выявления МПБ деталей параллельно вносятся изменения в граф изделия.

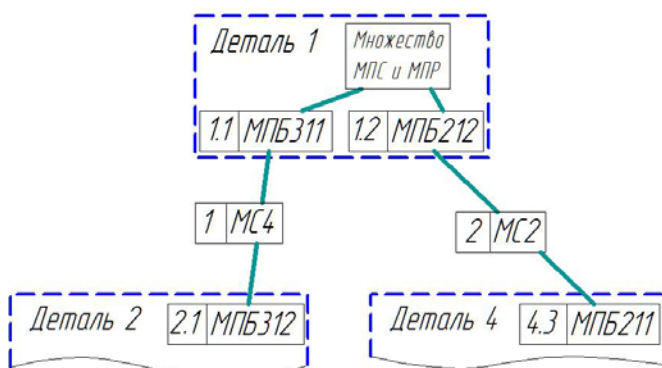


Рис.8. Фрагмент формируемого графа изделия

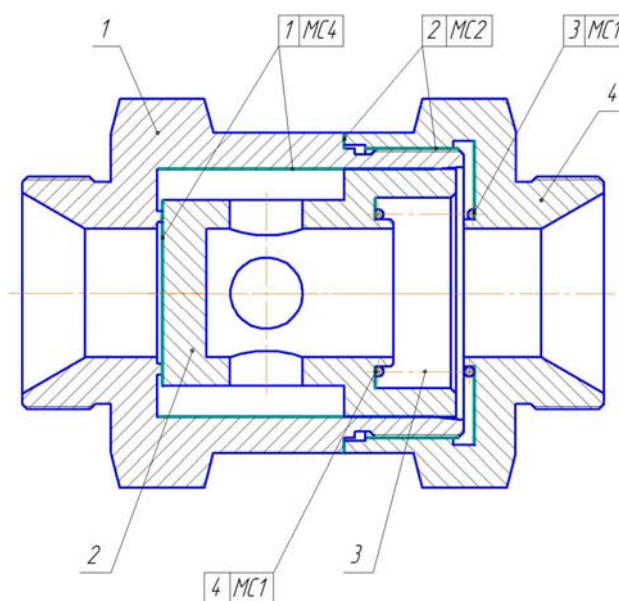


Рис.9. Выявленные МС

**A12. Модуль выделения базовых деталей и узлов** производит выявление базовых деталей для общей и узловых сборок, и выявление сборочных единиц (узлов). Для этого используются данные по массе, габаритам и количеству МС, которые образует деталь. Рассчитывается обобщенный коэффициент базовых деталей для каждой из деталей входящих в изделие.

$$K_{\text{ОБДи}} = K_{\text{мас}} + K_{\text{габ}} + K_{\text{МС}}, \text{ где}$$

$$K_{\text{мас}} = \frac{m_i}{m_{\text{max}}}, \quad m_{\text{max}} - \text{масса самой массивной детали, } m_i - \text{масса текущей}$$

детали,

$$K_{\text{габ}} = \frac{G_{\Sigma^i}}{G_{\Sigma^{\text{max}}}}, \quad G_{\Sigma^{\text{max}}} - \text{сумма габаритов самой большой детали, } G_{\Sigma^i} -$$

сумма габаритов текущей детали,

$$K_{\text{МС}} = \frac{n_{\text{МС}i}}{n_{\text{МС}^{\text{max}}}}, \quad n_{\text{МС}^{\text{max}}} - \text{количество МС которые образует деталь (с}$$

максимальным количеством МС),  $n_{\text{МС}i}$  - количество МС которые образует текущая деталь,  $0 < K_{\text{ОБДи}} \leq 3$ ,  $0 < K_{\text{мас}}, K_{\text{габ}}, K_{\text{МС}} \leq 1$ .

Деталь с наибольшим  $K_{ОбДi}$  принимается за базовую для всего изделия. На основании выбора базовой детали всего изделия строится *граф изделия* (рис.10). Остальные детали проверяются как базовые для сборочных единиц (СЕ) по определенным правилам с учетом связей в графе изделия (например, вал часто является базовой деталью для СЕ, или же деталь устанавливается с зазором в базовую всего изделия и т.п). Требуется выявление *четких правил выделения СЕ*. Далее на основании информации о СЕ граф изделия дополняется соответствующей информацией.

Рассчитаем  $K_{ОбДi}$  для деталей обратного клапана.

$$K_{ОбД1} = \frac{0,2кг}{0,2кг} + \frac{82мм + 65мм}{82мм + 65мм} + \frac{2}{2} = 3; \quad K_{ОбД2} = \frac{0,2кг}{0,2кг} + \frac{63мм + 48мм}{82мм + 65мм} + \frac{2}{2} = 2,75;$$

$$K_{ОбД3} = \frac{0,03кг}{0,2кг} + \frac{20мм + 30мм}{82мм + 65мм} + \frac{2}{2} = 1,49; \quad K_{ОбД4} = \frac{0,15кг}{0,2кг} + \frac{41мм + 65мм}{82мм + 65мм} + \frac{2}{2} = 2,41$$

Принимаем деталь поз.1(корпус) за базовую.

В соответствии с вышеизложенным алгоритмом получим окончательную структуру изделия - его граф (рис.10).

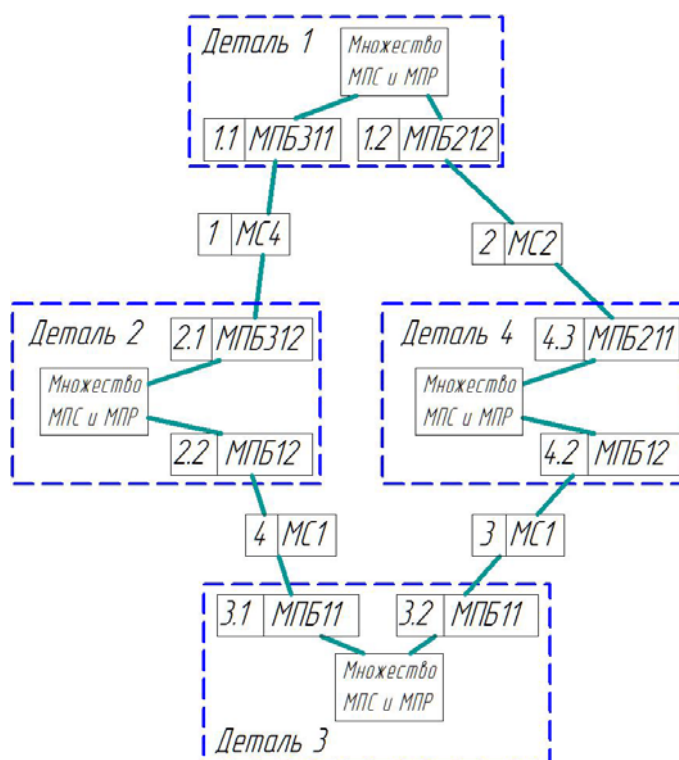


Рис. 10. Граф анализируемого изделия

## A2. Конструкторско-технологический модуль

Необходимо дать возможность конструктору пользоваться данным модулем для предварительной оценки возможности производства проектируемого изделия, его точностного анализа и приблизительной оценки технологичности по индексу DFA – Design For Assembly (рис.11).

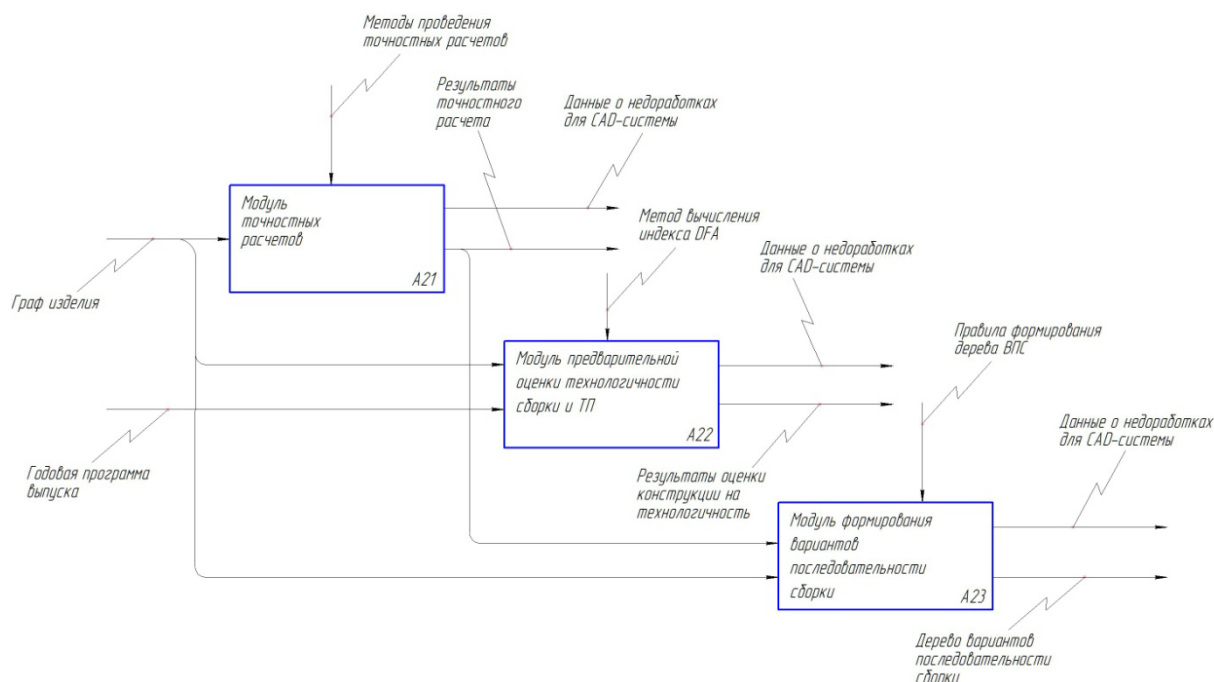


Рис.11. Конструкторско-технологический модуль А2

**A21. Модуль точностных расчетов** можно реализовать на основе работы [2] профессора Базрова (пространственные размерные цепи и метод замещения деталей машин совокупностью координатных систем с деформирующимися связями). Выявление размерных цепей (автоматическое преобразование данных о размерах в ГТМИ в пространственные размерные цепи) и расчеты проводятся на основании полученного ранее графа изделия (подробнее метод описан [6]). В данном модуле производится выявление технических требований (эксплуатационных и точностных), выполняется их анализ и разрабатываются схемы контроля и т.д. Также, при необходимости, реализуется расчет погрешностей сборки в зависимости от деформаций [7, стр.516](погрешности физико-механического характера) методом конечных элементов (используя расчеты, полученные в САЕ-системах), либо используя ранее полученный граф изделия [8], менее точно, по методу, описанному в [2, стр.169]. В целом же, данные расчеты наиболее целесообразны для прецизионных машин и соединений. По результатам расчетов будет приниматься решение о том, отправлять на доработку изделие в конструкторскую САПР с указанием недостатков или же далее формировать ТП.

**A22. В модуле предварительной оценки технологичности сборки и ТП** по графу изделия укрупнено проводится нормирование и выявляется необходимое для сборки оборудование (производится предварительная оценка возможности проведения производственно-технологического цикла сборки изделия в заданных условиях), а так же возможно проводится анализ по методу DFA [9, стр.219], для чего рассчитывается DFA Index:

$$E_{ma} = \frac{N_{\min} \cdot t_a}{t_{ma}} \cdot 100\%, \text{ где } N_{\min} - \text{теоретическое минимальное количество}$$

деталей в изделии,  $t_a$  - среднее основное время по переходам,  $t_{ma}$  - общее время сборки.  $t_a$ ,  $t_{ma}$  рассчитываются укрупнено, например по нормативам. Более подробное описание методики расчета данного показателя приведено в [9].

Пользователю предлагается выбрать целесообразность дальнейшего проектирования ТП для заданных условий производства, а также рекомендации для конструктора по изменению конструкции, направляемые в САД-систему или же в отдельный автоматически формируемый документ.

**A23.** В модуле формирования вариантов последовательности сборки строится совокупность всех возможных вариантов ТП на основании графа изделия – строится т.н. *дерево вариантов последовательности сборки (ВПС)* [5]. На верхнем уровне расположены все детали изделий, на нижнем – готовое изделие. Промежуточные уровни отражают все возможные варианты состояния сборки (ВСС) собираемого изделия. В процессе построения дерева исключаются невозможные ВСС на основании трех следующих критериев:

- входящая в состав ВСС деталь не образует с другими деталями данной ВСС модулей соединения;
- ВСС, состоящая из одной детали, не являющейся базовой;
- невозможности продолжения сборки изделия по причине отсутствия доступа к месту монтажа, детали входящей в следующий ВПС. Данный критерий выявляется на основе расчета столкновения твердотельных моделей, либо используя теорию игр (менее ресурсоемкий метод), как это показано в работе [4].

Построим дерево ВПС для анализируемого обратного клапана (рис.12).

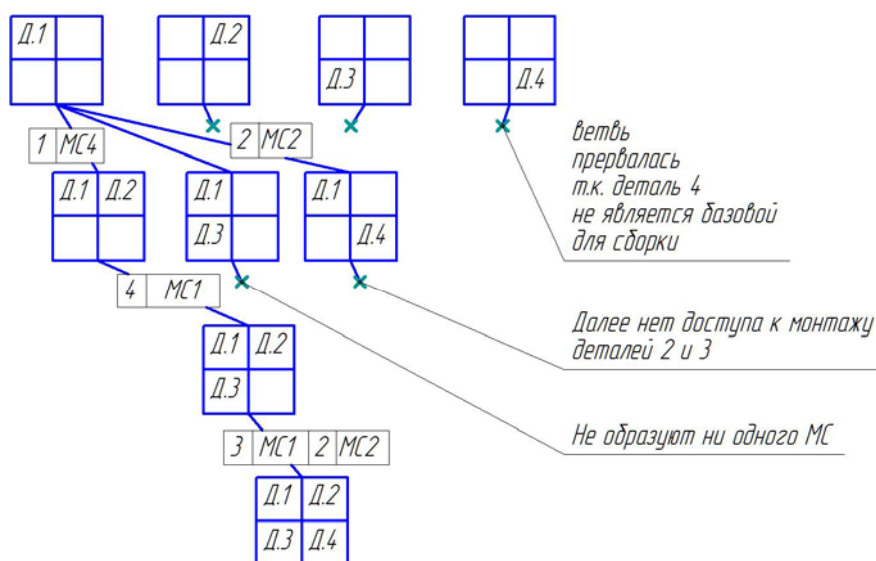


Рис.12. Дерево ВПС для клапана

### A3. Модуль формирования ТП

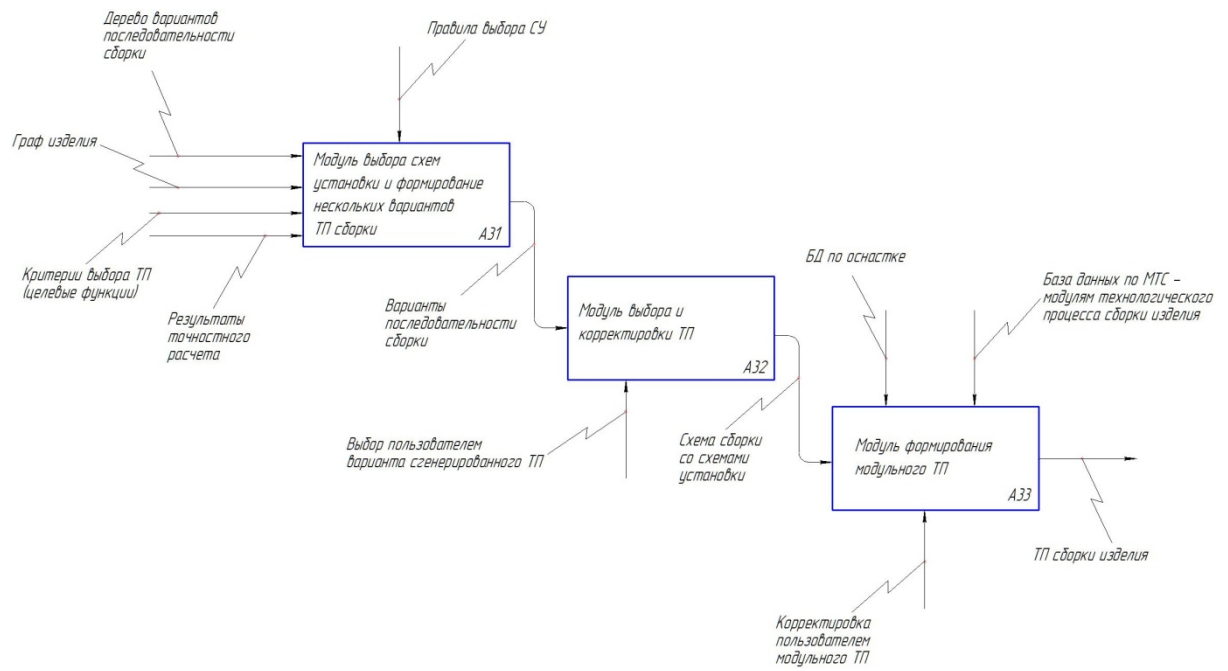


Рис.13. Модуль формирования ТП А3



**А31. Модуль выбора схем установки и формирование нескольких вариантов ТП сборки.** Выбираются схемы установки (СУ) по переходам. Переходы с возможно одинаковыми схемами установки располагают рядом в вариантах последовательности сборки – корректируется дерево сборки (сокращается количество вариантов). В результате работы данного модуля также возникает многовариантность – этот факт требует создания *четких правил выбора баз*. Формирование нескольких вариантов сборки на основании дерева ВПС.

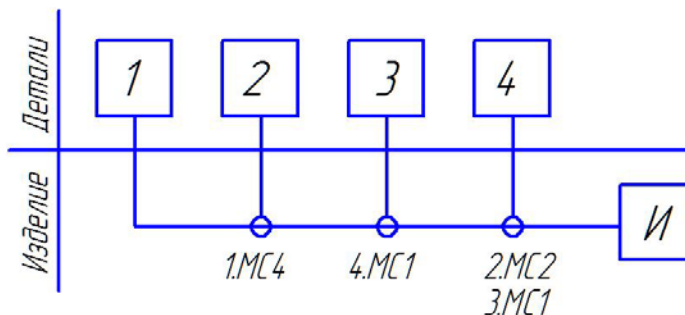


Рис.14. Последовательность сборки клапана

На рис.11 показан вариант последовательности сборки клапана полученный с помощью дерева ВПС. В отличие от традиционной схемы сборки в данной дополнительно указываются МС. Таких вариантов для изделий большей сложности может быть несколько.

**А32. Модуль выбора и корректировки ТП** служит для тесного взаимодействия с пользователем, выбора варианта ТП сборки, корректировки и визуализации выбранного варианта.

**А33. Модуль формирования модульного ТП сборки.** В данном модуле реализуется компоновка ТП сборки из МТС (модулей ТП сборки), которые содержатся в базе данных МТС.

**А4. Модуль формирования ТД (технологической документации)** на выбранный ТП. В соответствии с заданными правилами формируется технологическая документация на выбранный и откорректированный ТП сборки. Проводится окончательная визуализация сборочного процесса (она может послужить полезным дополнением к ТД). Визуализация должна храниться в формате, удобном для просмотра процесса сборки изделия с любой точки зрения в пространстве и предусматривающем хранение дополнительной информации о сборочном процессе.

Цель данной работы – показать принципиальную возможность создания САПР ТП сборки на сегодняшнем этапе развития работ в данной области. Существует методическое обеспечение – модульный подход к описанию конструкций изделий и производства. Выявлены основные направления исследований, обеспечивающих создание системы – разработка формальных правил выделения сборочных единиц, разработка формальных правил выбора баз, разработка методики оценки и выбора вариантов последовательности сборки, создание базы данных МТС (модулей ТП сборки). Предложен алгоритм автоматизированной генерации графа изделия.

Описанная выше система будет ориентирована на многономенклатурное и разносерийное производство, что является следствием использования в основе системы модульной технологии. Система по возможности должна работать в пакетном режиме с интерактивным вводом исходной информации. Прототип системы можно реализовать, в КОМПАС-Мастер, как библиотеку [10] – для ускорения проверки работоспособности концепции в целом, не связываясь с тонкостями программной работы с 3D графикой (используя 3D-ядро КОМПАСа для этой цели), либо в любой другой САПР с открытой архитектурой и 3D-ядром.

### Литература

1. *Базров Б.М.* Модульная технология в машиностроении – М.: Машиностроение, 2001.
2. *Базров Б.М.* Расчет точности машин на ЭВМ – М.: Машиностроение, 1984.
3. *Кондаков А.И.* САПР технологических процессов – М.: Академия, 2008.
4. *Божко А.В.* Игровое моделирование доступа/ Наука и образование, 2009, №12.
5. *Gottipolu R.V.* Representation and selection of assembly sequences in CAAPP / International journal of production research, 1997, №12.
6. *Базров Б.М.* Построение размерных цепей изделия с помощью графа модулей поверхности/ Вестник машиностроения, 2008, №7.
7. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения – М.: Машиностроение, 2001.
8. *Базров Б.М.* Единый подход в построении расчетных моделей изделия как механической системы/ Сборка в машиностроении и приборостроении, 2009, №5.
9. *Boothroyd G.* Assembly Automation and Product Design (Second Edition) – Taylor&Francis, 2005.
10. *Кидрук М.И.* КОМПАС-3D V10 на 100 % – С-Пб.: Питер, 2009г.

УДК 539.43

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Хакимова Регина Рамилевна*

*Магистр 2 года,  
кафедра «Технология машиностроения»  
Уфимский государственный авиационный технический университет*

*Научный руководитель: А.М. Щипачёв,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Технология  
машиностроения»*

Циклическое нагружение является широко распространенным видом нагружения деталей машин и элементов конструкций в процессе эксплуатации. Экспериментальное определение показателей сопротивления усталости в каждом конкретном случае – длительная и дорогостоящая процедура. Необходимость сокращения материальных и технических затрат требует разработки методов прогнозирования свойств материала, в том числе и на основе обобщения полученных ранее экспериментальных данных. Несмотря на многообразие существующих методов прогнозирования усталостной прочности, точное моделирование процесса усталостной повреждаемости и разрушения является затруднительным ввиду сложности явлений при этом происходящих.

Для задачи прогнозирования в различных областях науки и техники в последнее время применяется относительно новый метод, основанный на комбинировании нечеткой логики и нейронных сетей - нейро-нечеткое моделирование [1]. Нечеткие системы позволяют дать понятную интерпретацию выполняемых действий, но не способны обучаться, то есть производить автоматическую настройку параметров функций принадлежности на основе известной информации. В противоположность к ним искусственные нейронные сети могут настраивать свои параметры (весовые коэффициенты), но реализуемые ими функции не поддаются понятной интерпретации. Гибридные нейро-нечеткие системы (ННС) нашли самую большую область применения среди всех возможных методов синтеза нечетких множеств и нейронных сетей. Связано это с тем, что именно они позволяют наиболее полно использовать сильные стороны нечетких систем и искусственных нейронных сетей. С одной стороны, они могут рассматриваться как нечёткие системы (а значит, понятно интерпретировать получаемые результаты), а с другой – как нейронные сети, состоящие из нейронов специального вида (а значит, могут обучаться). Наиболее

распространенной архитектурой ННС являются адаптивные нейро-нечеткие системы вывода ANFIS (от англ., Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System )

Входящие в гибридную сеть переменные фаззифицируются – т.е. задается вид функции принадлежности (треугольный, сигмоид, гауссиан и т.п.) и конкретное ее значение, соответствующее входящей переменной. Далее идут операции над нечеткими множествами, формируется нечеткий вывод, затем в результате дефаззификации получаем четкий вывод - числовое значение выходной переменной [2].

Имея базу экспериментальных данных испытания данного материала на усталость, мы можем предсказать значение ее усталостной долговечности при определённых параметрах. Эти параметры будут служить нам входными и выходными переменными при построении нейро-нечёткой модели.

При этом данная модель зачастую адекватнее сложной и громоздкой аналитической модели, создается проще и быстрее. При изменении неких констант она легко переобучается.

Рассмотрим этот подход на примере усталостной долговечности стали ХН51ВМТЮКФР в зависимости от температуры испытания после операции шлифования. Первая входная переменная будет соответствовать температуре испытания  $t$ , вторая – амплитуде переменных напряжений  $\sigma_a$ . Выходной переменной будет служить усталостная долговечность  $N$ . Данные были взяты из [3].

Разработка гибридной сети и работа с ней проводились в математическом пакете MATLAB 7 в редакторе Anfisedit, который реализует систему нечеткого вывода Сугено в виде пятислойной нейронной сети прямого распространения сигнала.

Проверили точность построенной системы на тех данных, которые не вошли в обучающую выборку ( $t=850^\circ$ ,  $\sigma_a=315\text{МПа}$ ). Получили значение  $N$ , равное  $6.3682 \cdot 10^6$ . Сравнивая это значение со значением, взятым из имеющихся экспериментальных данных[3], видно, что они очень близки и относительная погрешность составляет всего 0.36%. Таким образом, построенную нечеткую модель гибридной сети можно считать достаточно точной для прогнозирования УД.

На рис. 1 приведена поверхность “входы-выход”, где входами являются влияющие факторы температура  $t$  и амплитуда переменных напряжений  $\sigma_a$ , выходом – число циклов  $N$ .

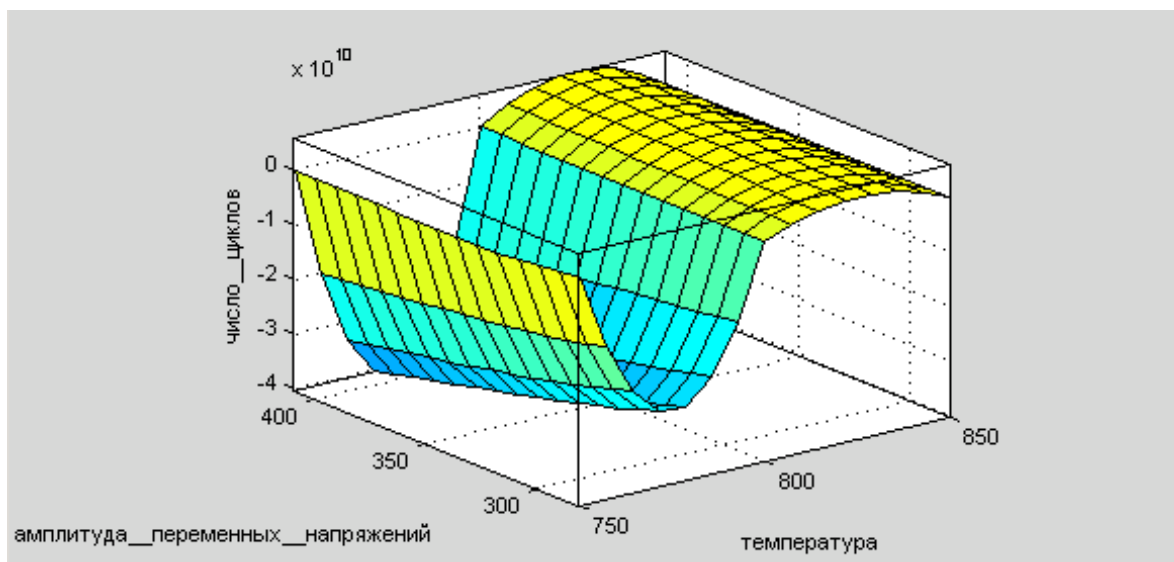


Рис. 1 - поверхность “входы-выход”, соответствующая синтезированной нечеткой системе

Также, данный подход был проверен на примере образцов из стали 30ХГСНА, которые были обработаны пневмодинамическим упрочнением после шлифования [4]. Для этого построили отличную от предыдущего случая нейро-нечёткую модель с иными входными и выходными параметрами. Входными переменными приняли действующие на глубине  $x$  остаточные напряжения  $\sigma_{r1}$  и твердость HV01, а выходной переменной приняли относительную усталостную долговечность  $\eta$ . Рассмотрели изменение этих параметров с шагом 10 мкм: на этом массиве произвели обучение ННС. Тестирующая выборка была получена по значениям и HV01, полученным с диаграммы рис.2 через шаг 10 мкм (сдвиг относительно обучающей выборки 5 мкм). Результаты прогнозирования  $\eta$  нанесены на диаграмму рис.2.

Видно, что расчетные значения, полученные с использованием ННС, практически лежат на кривой распределения  $\eta$ . Это свидетельствует о том, что применение ННС дает такие же результаты, как и расчет по аналитическим зависимостям автора [4] и, кроме того, проще и быстрее в реализации.

Проверка адекватности нейро-нечёткой модели также, как и в предыдущем случае, показала, что применение ННС эффективное и достаточно точное в прогнозировании усталостной долговечности.

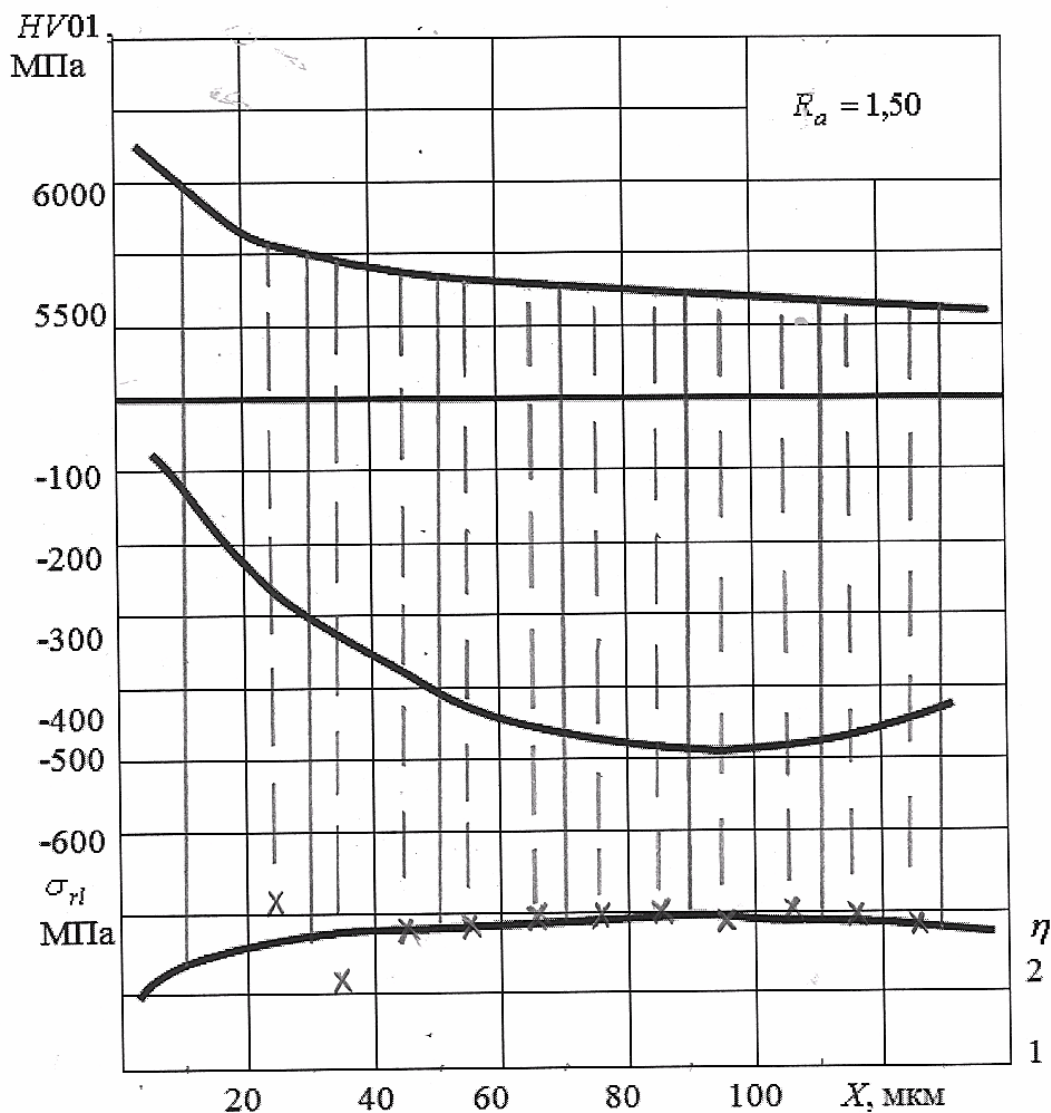


Рис. 2 - Распределение микротвердости HV01, осевых остаточных напряжений  $\sigma_{ri}$ , относительной усталостной долговечности  $\eta$  по глубине поверхностного слоя стали 30XГСНА после операции пневмодинамического упрочнения; x- выходные данные проверочной выборки

## ВЫВОДЫ

1. Показана эффективность применения ННС для прогнозирования усталостной долговечности металлов с учетом влияния различной температуры эксплуатации и технологий поверхностной обработки.
2. Можно предположить, что ННС будут эффективны для определения и других характеристик прочности и пластичности материала.
3. Разработка, обучение и применение ННС для целей прогнозирования проще и быстрее, чем создание расчетных зависимостей (эмпирических, феноменологических, полуэмпирических) и их применение.

4. Для прогнозирования с применением ННС возможно использование нечеткой информации, которая не учитывается при применении аналитических расчетных зависимостей.

#### **Литература**

1. *Рутковская, Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Данута Рутковская, Мачей Пилиньский, Лешек Рутковский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 452 с. – ISBN 5-93517-103-1(в пер.).
2. *Дьяконов, В.П.* MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов –. М.: Солон-Пресс, 2006 – ISBN 5-98003-255-X.
3. *Мухин В.С.* Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД. –М:Наука,2005.-296 с. – ISBN 5-02-035038-9
4. *Щипачев, А.М.* Методы расчета усталостной долговечности и предела выносливости с учетом модифицированных поверхностных слоев / А.М. Щипачёв. Уфа: УТИС, 2000. – 110 с. – ISBN 5-88469-058-4.

**Секция 5**  
**Литейные технологии**



УДК 621.74.669, 621.74.04

## ОПТИМАЛЬНАЯ ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА И СПОСОБ ЛИТЬЯ ПРИ ЗАЛИВКЕ УЗОРОВ В ЮВЕЛИРНОМ ЛИТЬЕ

Лазарев Алексей Владимирович

*Студент 6 курса*

*кафедра «Литейные технологии»*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана  
(МГТУ им. Н.Э.Баумана)*

*Научный руководитель: Мандрик А.А.,*

*доцент кафедры «Литейные технологии»*

### Введение

Одной из проблем в ювелирном литейном производстве является изготовление качественных ажурных узоров. Для достижения требуемого результата используют различные методы и способы литья, проводят множество экспериментов.

### Постановка задачи

На ювелирной фирме по производству обручальных и свадебных колец, была поставлена задача - выявить причины, по которым возникает брак популярного ажурного узора (Рис.1) при литье. Это позволит уменьшить время изготовления колец, снизить их себестоимость.

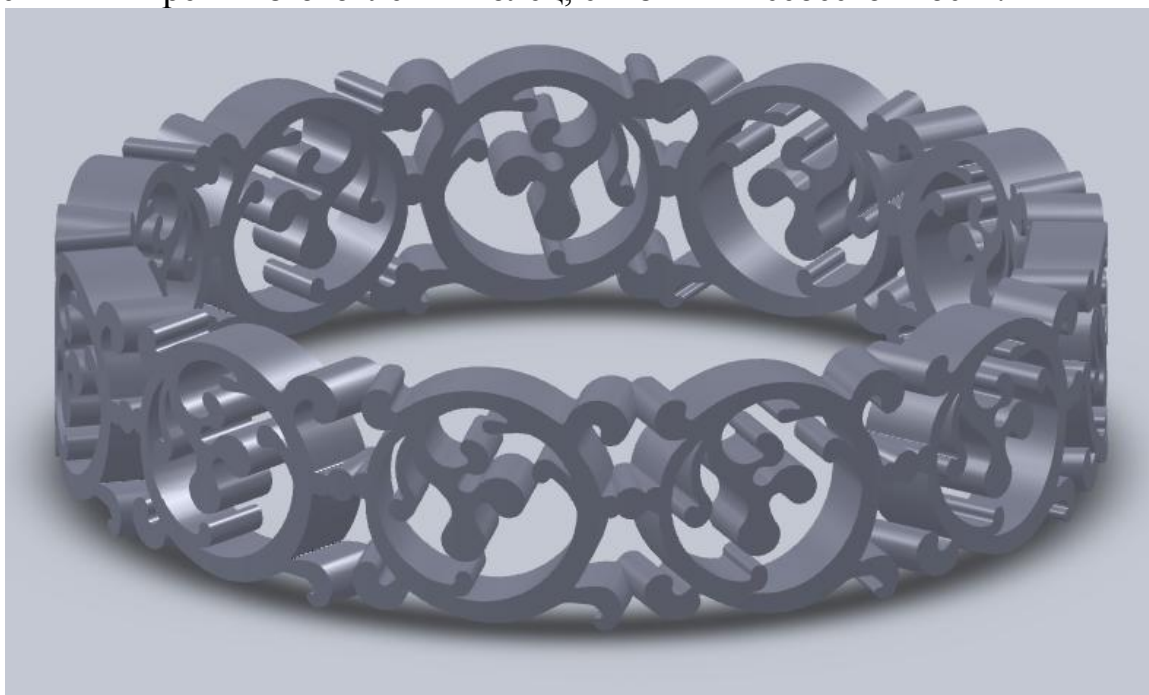


Рис.1. 3d-модель «Ажурного узора»

## Метод решения

Для решения этой проблемы были рассмотрены все этапы технологического процесса изготовления ювелирного изделия (Рис.2).

*Технологический процесс изготовления ювелирных изделий на предприятии "Властелин колец"*

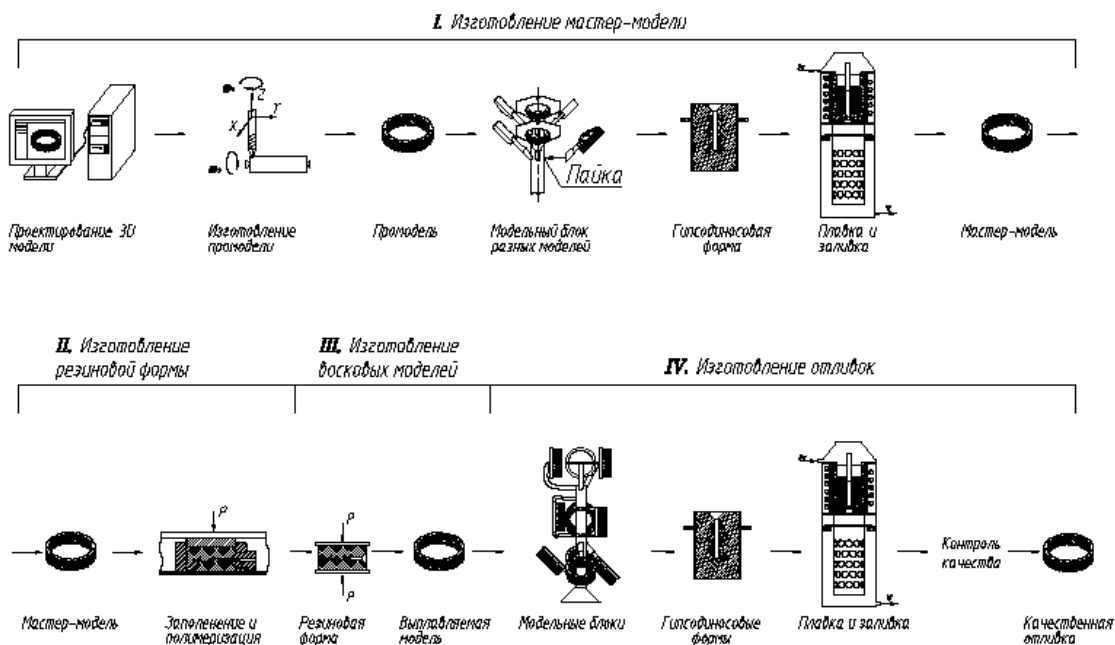


Рис.2. Технологический процесс изготовления ювелирного изделия

Наибольшее влияние оказывают литниково-питающая система (ЛПС) и способ литья на брак отливки «Ажурный узор».

Были составлены возможные ЛПС (Рис.3.) на основе рекомендаций из книг [3],[4] и возможных вариантов их размещения, а так же опыта литейщика предприятия.



Так же были проанализированы возможности предприятия и выделены четыре способа заливки. Для того чтобы определить наиболее эффективный способ литья, эксперименты проводились на трех литейных машинах, обеспечивающих четыре вида литья:

1. Гравитационное литье без вакуумирования формы в атмосферной среде.

Заливку данным методом производил на установке KayaCast (Рис.4.).

Установка предназначена для формовки опок и литья. Для формовки в установке предусмотрен вакуумируемый колпак, располагаемый на вибростоле. Литье осуществляется в специальной камере.



Рис.4. Установка KayaCast

2. Гравитационное литье с вакуумированием формы в атмосферной среде.

Заливку данным методом производил на вакуумной литейной установке КЛИО-ЛМ-И-1.0 (Рис.5.).



Рис.5. Вакуумная литейная установка КЛИО-ЛМ-И-1.0

Время цикла плавки: 8-10 минут;

Инертный газ: технический азот или аргон при давлении 0,7 атм (10 psi) – 5 л в минуту;

Вакуумный насос: 20м<sup>3</sup>/ч;

Расход воды для охлаждения генератора КЛИО ЛМ И 1.0 ~ 2л/мин.

В установках используются проверенные и надежные принципы литья в закрытой системе. Бескислородная атмосфера в период плавки и заливки металла обеспечивается подачей инертного газа над расплавом.

Температура расплава металла измеряется в центральной части с помощью термопары, помещенной в шток, что дает точную информацию о температуре расплава. Тигель предусматривает заливку металла через отверстие в дне тигля, т.е. падение температуры от тигля до опоки - минимально. Это позволяет производить заливку при оптимальных температурах, не перегревая металл. Опока при заливке металла вакуумируется.

Для обеспечения данного метода инертный газ не подавался.

3. Гравитационное литье с вакуумирования формы в среде защитных газов.

Заливку этим методом производил на той же вакуумной литейной установке КЛИО-ЛМ-И-1.0, но при этом инертный газ подавался.

4. Центробежная заливка без вакуумирования в атмосферной среде.

Заливку данным методом производил на центробежной установке PRO CRAFT (рис.6.).



Рис.6. Центробежная установка PRO CRAFT

Литье происходит под воздействием центробежных сил – в основание устройства вмонтирована мощная пружина, под воздействием которой происходит вращение рычага с установленным на ней противовесом с одной стороны и тиглем с опоккой – с другой.

Установкам KayaCast и PRO CRAFT для плавления металла дополнительно необходима плавильная электропечь ЮФ-520АС (Рис.7.), предназначенная для управляемого нагрева и выплавки металла. Металл нагревался до температуры 985 °С и выливался в тигель центробежной установки или форму установки KayaCast.

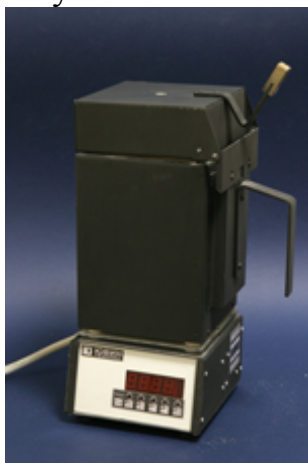


Рис.7. Плавильная электропечь ЮФ-520АС

Для литья изделий из золотых и серебрянных сплавов с температурой заливки 900 - 1100°С широкое распространение получили смеси с гипсом в качестве связующего. В данном случае выбираем формовочную массу Satin Cast 20, которая специально разработана для литья драгоценных сплавов на основе золота, серебра.

Формовка происходит с учетом рекомендаций по соотношениям воды и сухой формовочной массы, при этом происходит вакуумирование формовочной камеры и вибрация стола, на котором стоит опока.

Далее приступают к выплавлению модельного состава из формы. Выдерживают форму при температуре 80°С в течение 1 часа литниковой чашей вниз. Расплавленная модельная масса частично впитывается в поры гипсо– диносовой смеси (до 60-70% общего количества модельной массы), частично стекает в поддон под опокой. Далее опоки продолжают прокалывать в той же печи, предварительно удалив поддон для сбора модельной массы.

В процессе прокалывания в печи необходимо поддерживать окислительную атмосферу, чтобы продукты деструкции модельного состава полностью газифицировались, и, в том числе, произошло полное окисление образующегося пироуглерода во внутренних частях формы. Иначе рабочая поверхность формы окажется шероховатой, а качество отливок невысоким. Это связано с тем, что пироуглерод может смываться потоком расплава и замешиваться в металл, повышая количество неметаллических включений.

Пока прокаливается форма, необходимо приступить к плавке металла, стремясь к одновременному окончанию прокалывания и плавления.

Заливку формы проводили сплавом серебра 925 пробы. Серебро 925 пробы содержит не менее 92,5% серебра, остальное – медь, имеет благородный серебристо - белый цвет и высокие антикоррозийные свойства. Серебро данной пробы хорошо плавится и принимает различные формы, в последствие ювелирное изделие сохраняет твердость и мало подвержено атмосферным явлениям. Для всех способов заливки температуры опок были 580 °С. По рекомендациям из [3] температура металла для 2 и 3 способа была 985 °С, а для 1 и 4 - 1005 °С.

После заливки форму охлаждают на воздухе 10-15 минут, а затем вымывают в баке с водой. Гипс, постепенно растворяясь, освобождает стояк с отливками. Далее отливки отделяют от стояка и очищают от гипсо-динасовой смеси. Затем стояк с отливками сушат и отбеливают. Далее производилась оценка результатов по видам дефектов представленных в Таблице 1.

При Пороке I менее 90% оценка остальных Пороков не актуальна.

**Таблица 1. Виды дефектов**

<b>Недолив</b>	<b>Усадочная пористость</b>
Порок I	Порок II
	
<p>Недолив - это когда модели не полностью заполняются металлом во время процесса заливки.</p> <p>Условия оценки: При Пороке I менее 90% оценка остальных Пороков не актуальна.</p>	<p>Усадочная пористость обычно проявляется в виде маленьких дырочек на поверхности отливок. При близком рассмотрении дырочки видны не как круглые, а как неровные угловатые, обычно с поверхностью дендритовой структуры. Усадочная пористость - это самый распространенный тип пористости.</p> <p>Усадка возникает из-за неравномерного затвердевания участков отливки.</p>
Критерий: процент заполненной	Критерий: балл

формы «Ажурного узора»	
------------------------	--

<b>Газовая пористость</b>	<b>Включения</b>
Порок III	Порок IV
	
<p>Газовая пористость проявляется в виде мельчайших дырочек на поверхности литья. В противоположность усадочной пористости, эти дырочки в основном круглые и сглаженные. К тому же дырочки концентрируются в слое, расположенному сразу под поверхностью литья, т.е. они не видимы в отливках, но проявляются после полировки. Существует две основные причины для этого сорта дефекта: взаимодействие с формовочной массой и загрязнения, которые присутствуют в рециклируемом металле.</p>	<p>Включения могут разделяться на два типа:</p> <p>а.) Посторонние частицы попавшие извне, как например частички формовочной массы.</p> <p>б.) Включения, образованные за счет реакции между элементами сплава - такими как, например оксиды и сульфиды меди и серебра.</p>
Критерий: балл	Критерий: балл

На основе полученных данных были составлены таблицы с результатами экспериментов. Таблица 2,3,4,5.



**Таблица 2**

1. Гравитационная заливка без вакуума

№ эксперимента	Пороки			
	I	II	III	IV
1.1	17	-	-	-
1.2	10	-	-	-
1.3	15	-	-	-
1.4	2	-	-	-
1.5	10	-	-	-
1.6	1	-	-	-
1.7	20	-	-	-
1.8	1	-	-	-
1.9	5	-	-	-
1.10	0	-	-	-
1.11	2	-	-	-
1.12	2	-	-	-
1.13	0	-	-	-
1.14	15	-	-	-
1.15	25	-	-	-
1.16	0	-	-	-
1.17	5	-	-	-
1.18	20	-	-	-
1.19	0	-	-	-
1.20	15	-	-	-

**Таблица 3**

2. Гравитационная заливка с вакуумом

№ эксперимента	Пороки			
	I	II	III	IV
2.1	80	-	-	-
2.2	49	-	-	-
2.3	75	-	-	-
2.4	50	-	-	-
2.5	100	1	2	1
2.6	92	2	3	1
2.7	98	2	3	2
2.8	97	1	3	1
2.9	98	1	2	1
2.10	96	1	2	2
2.11	100	1	2	1
2.12	100	1	3	1
2.13	70	1	1	1
2.14	100	1	3	2
2.15	100	1	2	1
2.16	98	1	2	1
2.17	100	1	2	1
2.18	100	1	2	2
2.19	96	1	2	1
2.20	100	1	2	1

**Таблица 4**

3. Гравитационная заливка с вакуумом в среде инертного газа

№ эксперимента	Пороки			
	I	II	III	IV
3.1	50	-	-	-
3.2	40	-	-	-
3.3	52	-	-	-
3.4	35	-	-	-
3.5	97	1	1	2
3.6	90	2	2	1
3.7	98	1	1	2
3.8	90	1	3	1
3.9	95	1	1	1
3.10	98	1	1	2
3.11	100	1	1	1
3.12	99	1	1	1
3.13	80	1	1	1
3.14	100	1	2	1
3.15	100	1	1	1
3.16	99	1	1	1
3.17	100	1	1	2
3.18	100	1	1	1
3.19	99	1	1	1
3.20	100	1	1	2

**Таблица 5**

4. Центробежная заливка без вакуума

№ эксперимента	Пороки			
	I	II	III	IV
4.1	35	-	-	-
4.2	50	-	-	-
4.3	48	-	-	-
4.4	30	-	-	-
4.5	100	1	1	2
4.6	91	1	2	1
4.7	100	1	3	1
4.8	90	2	3	1
4.9	92	1	2	1
4.10	20	-	-	-
4.11	96	1	2	1
4.12	97	1	3	2
4.13	90	1	2	1
4.14	96	1	2	2
4.15	99	1	2	1
4.16	27	-	-	-
4.17	98	1	3	1
4.18	100	1	2	1
4.19	93	1	3	1
4.20	100	1	3	2

### Выводы из полученных результатов

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. ЛПС №15 является самыми оптимальными для данного типа отливок.
2. ЛПС №17 является оптимальной, но с использованием данной ЛПС количество моделей расположенных на стояке будет меньше чем при ЛПС №15.
3. ЛПС №12,14,18,20 являются менее оптимальными из-за трудоемкости их изготовления и того что они могут быть расположены только под стояком. Этим ограничивается их применение.
4. Способ литья, дающий наиболее качественный результат – это гравитационное литье с вакуумированием формы в среде защитных газов.

### Контрольная заливка

Для проверки правильности выводов была проведена контрольная заливка ЛПС №15, с использованием гравитационного литья с вакуумированием формы в среде защитных газов (Рис.8).



Рис. 8. Контрольная заливка

## Литература

1. Основы теории формирования отливки: Учеб. Пособие в 2 ч. Баландин Г. Ф. Ч 1-2. М.: Машиностроение, 1976-1979.-328 с.: 335 с.
2. Литьё по выплавляемым моделям. под общ. ред. Я.И. Шкленника , В.А. Озерова. – 3-изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение,1984.
3. Теория и практика ювелирного дела. Э.Бриполь.
4. Ювелирное литье. И.А. Халилов, М.И. Халилов.
5. Справочник литейщика. Н.Д. Орлов, В.М. Чурсин.
6. Цветное литьё. Справочник. Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф. и др – М. Машиностроение.- 1989. –528 с.
7. Справочник по дефектам литья и иным порокам ювелирных изделий из золота. Дитер Отт, Пер. с англ. – Омск: Издательский Дом «Дедал-Пресс», 2004. – 92с., с ил.
8. Рекламные проспекты фирм. INDUTHERM, TOPCAST, DORAMATIC, YASUI, DENTAURUM, КЛИО, FORNAX, Рундист.
9. Internet.

УДК 621.074.01.02

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ НА ОСНОВЕ ВОДНОГО РАСТВОРА КРЕМНЕЗОЛЯ

Родионова Ольга Евгеньевна

*Студентка 4 курса*

*кафедра «Машины и технология литейного производства»*

*Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)*

*Научный руководитель: Емельянов В.О.,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства»*

Литье по выплавляемым моделям остается основным способом получения точных заготовок сложной конфигурации. На Российских заводах технология ЛВМ применяют с использованием этилсиликата. ЭТС токсичен и пожароопасен. Его отверждение в ряде случаев требует применения газообразного аммиака. Замена ЭТС водным раствором кремнезоля предполагает использование импортных материалов. Отечественные аналоги «Армосил» и «Сиалит-20» не отвечают требованиям современного литейного производства. Их технологические характеристики допускают использование связующих лишь в единичном производстве без применения механизации. Основным недостатком отечественных материалов низкая прочность до прокали. Разрушающие напряжения при изгибе составляют от 3 до 7МПа в зависимости от типа наполнителя. Формы выполненные на ЭТС и испытанные по аналогичной методике имеют прочность на изгиб 10...15МПа.

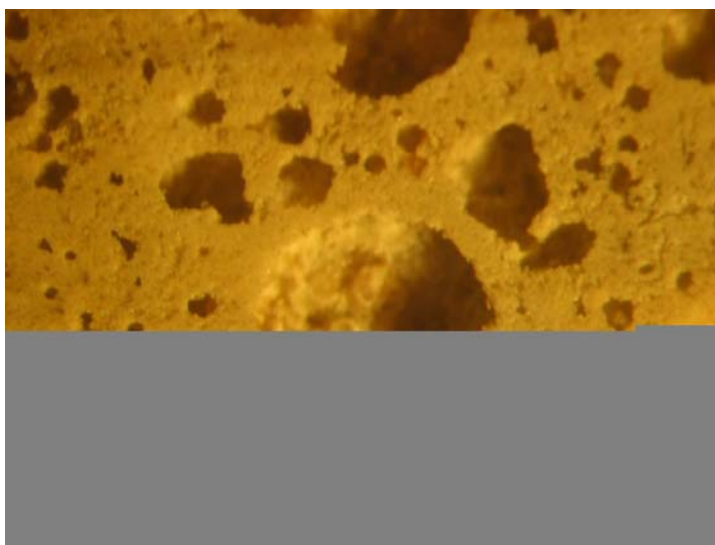


Рис. 1. Структура керамической формы после гелеобразования. ( $\times 140$ )

Причина низкой прочности форм на отечественном кремнезоле «рыхлая» макроструктура керамики и растрескивание пленки связующего на микроуровне. Пористость форм Рис.1. связана с возникновением стационарных состояний в процессе гелеобразования. Стационарные динамические структуры (визуально напоминают ячейки Бернара) приводят к образованию сферических полостей диаметром 0,1...0,5мм. Перемещение выделяющейся при гелеобразовании воды также способствует формированию пористости. В результате этого процесса частицы обсыпки связаны не манжетами огнеупорной суспензии, а лишь точечными перемычками. Гель кремнекислоты в свою очередь образует кристаллы размером 0,001...0,005мм.

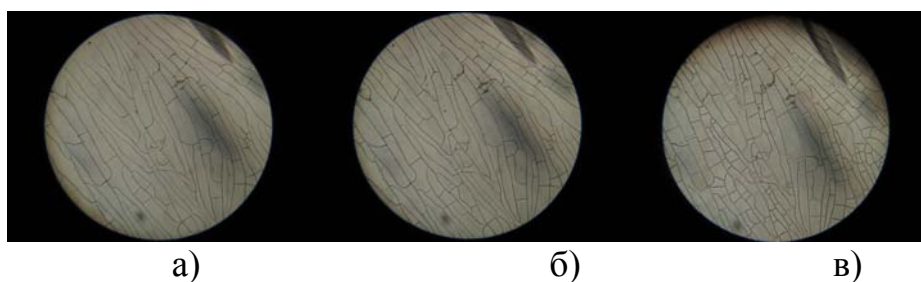


Рис.2. Образование ячеистой структуры при гелеобразовании водного раствора кремнезоля где: а) с момента нанесения пленки связующего 90с, б) то же через 120с, в) то же через 600с.

Рост кристаллов начинается с края пленки и продвигается к центру. В дальнейшем происходит дополнительное поперечное растрескивание и увеличение зазора. Промежутки между кристаллами заполнены жидким стеклом которое образуется при стабилизации кремнезоля натриевой щелочью.

Данный вопрос прояснялся следующим образом: были взяты два образца с пленкой кремнегеля на кварцевом стекле (рис.3), один образец помещался в воду на 2 часа, после чего оба образца были прокалены до температуры 850°C. При увеличении 200× видно, что образец, выдержанный в воде внешне не отличается от образца не прошедшего прокаливку, а образец не прошедший промывку водой дает двойную структуру, состоящую из зерен кварца и натриевого силиката, имеющего температуру плавления 793°C. Остаточное жидкое стекло оказывает разупрочняющее действие при вытопке модельного состава в воде. Прочность керамики при этом может падать до 1МПа.

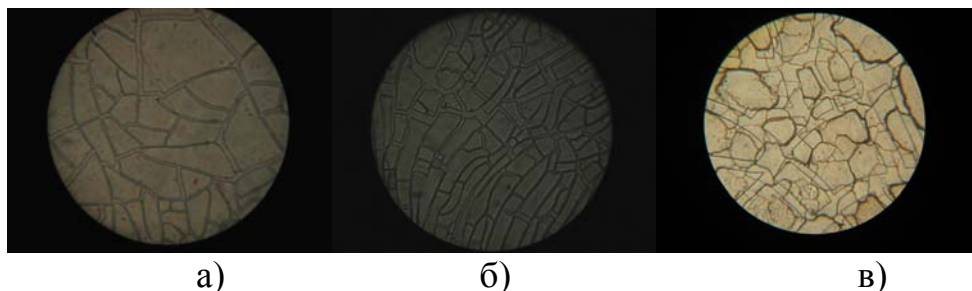


Рис.3. Структура пленок связующего «Амосил» увеличение  $200\times$  где: а) пленка после нанесения на кварцевое стекло, б) пленка выдержанная в воде 2 часа и прокаленная до  $850^{\circ}\text{C}$ , в) пленка прокаленная до  $850^{\circ}\text{C}$ .

Вопрос увеличения прочности керамических форм на водном растворе кремнезоля можно разделить на два направления:

1. Ведение добавок препятствующих возникновению динамических объектов и способствующих улучшению макроструктуры керамики.
2. Введение органических добавок с целью получения бинарного связующего в котором прочность до прокалики обеспечивает органическая составляющая, а при повышении температуры кремнегель.

В качестве добавок препятствующих существованию стационарных состояний должны выступать вещества смещающие величину сродства процесса гелеобразования. Практически это можно осуществить изменением толщины двойного электрического слоя мицелл кремнезоля, т.е. введением слабых электролитов. Побочным эффектом такого решения является снижение стабильности кремнезоля и соответственно времени живучести суспензии. Были опробованы соединения содержащие бор или магний. Параметром выбора был диаметр атома добавки близкий диаметру атома кремния. Бор резко повышает седиментационную устойчивость, но не дает эффекта упрочнения. Магний в виде тонкодисперсной окиси магния повышает прочность на  $5\dots 10\%$ , но суспензия становится не стабильной по гелеобразованию Рис. 4. Кроме того значение прочности не достигает параметров импортных аналогов кремнезелей, а прочность до прокалки составляет  $5\dots 7\text{МПа}$  (на рис.4 не показано).

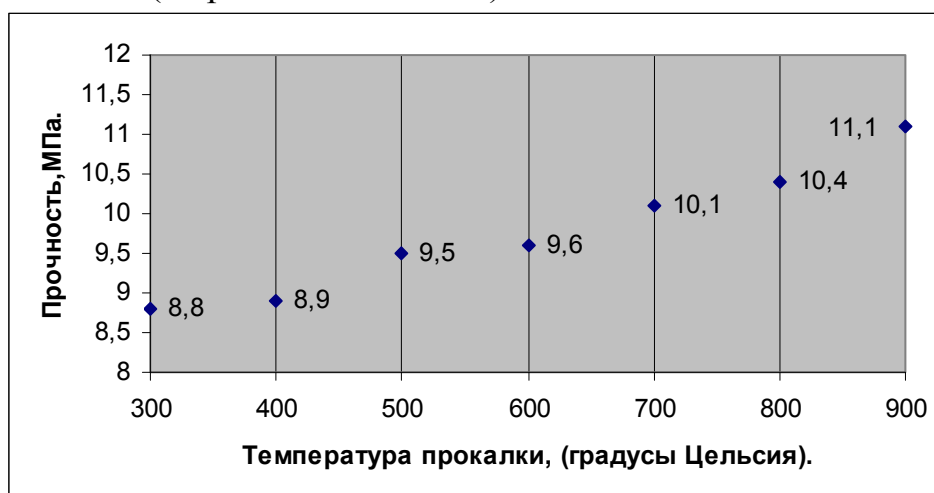


Рис. 4. Зависимость прочности керамической формы МПа на основе Армосил+ 0,5% окиси магния от температуры прокалики °С

Вариантом увеличения прочностных свойств является применение органических добавок. Выбор в данном случае определяется РН соединения, РН точки полимеризации и прочностная характеристика керамики. В качестве опытной добавки был использован бутилстирол с радиусом частиц 35...40нм при РН=8 и точкой полимеризации при РН=9. Кремнезоль имел РН=8 при концентрации  $\text{SiO}_2 = 20\%$ . Керамические формы выполнялись на кварцевом песке с диаметром частиц от 0,63мм на первом слое до 1,5мм на четвертом слое.

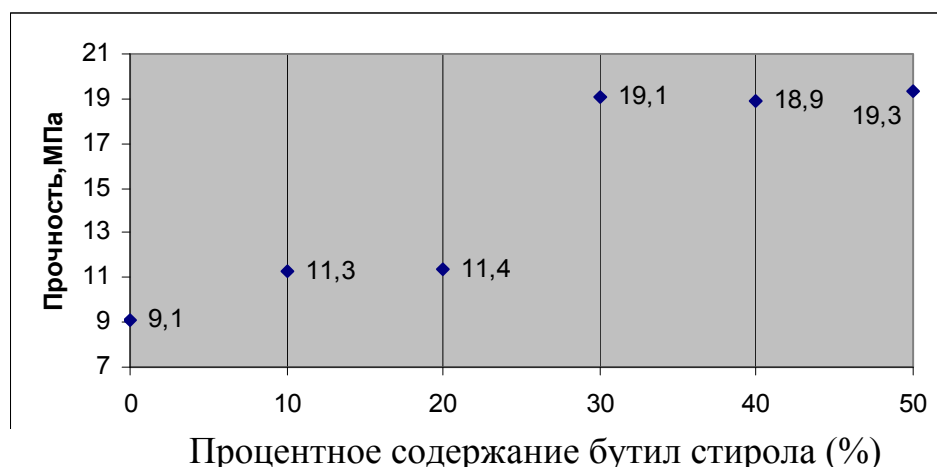


Рис. 5. Зависимость прочности непрокаленной керамической формы МПа на основе Армосила и кварцевого песка от процентного содержания бутилстирола

Установлено, что добавка бутилстирола в количестве 8...12% от массы связующего увеличивает прочность не прокаленной керамики до 15...18МПа. Рис. 5.. После прокалики прочность составляет 10...13МПа.

Для изготовления форм на автоматизированных линиях и заливки в опорном наполнителе эти параметры можно считать удовлетворительными. Однако требуются дополнительные исследования по подбору органических добавок. Сведения приводимые компанией «ДЮПОНТ» в открытой печати показывают, что органическая составляющая не только повышает прочность не прокаленной керамики, но также позволяет увеличить кроющую способность суспензии (остаток на плите по терминологии «ДЮПОНТ»).

Кроме экологического аспекта перехода с ЭТС на водные растворы кремнезоля имеется возможность энергосбережения. Как показали опытно промышленные испытания температура прокалики форм под заливку стали может не превышать  $500^{\circ}\text{C}$  (если позволяет толщина детали). По видимому это связано с отсутствием кремнеорганической составляющей процесса поликонденсации при образовании геля. Бинарные связующие представляют собой химически не связанные компоненты и деструкция полимера не препятствует удалению воды из кремнегеля. В целом технология ЛВМ на

водном растворе кремнезоля с добавкой бутилстирола позволяет получать отливки из черных и цветных металлов массой от 0,1 до 100кг.

### **Литература**

1. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Бречко А.А. Структура и свойства керамических форм на связующем «Армосил» Литейщик России. – 2007. – № 6, с. 13-14
2. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Бречко А.А. Особенности технологии изготовления керамических форм на основе водного раствора кремнезоля Санкт-Петербург, РИО, Издание Санкт-Петербургского института машиностроения, 2007 г.



## **РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗМЕРА ПРИ ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ОТЛИВКИ ТИПА ВОЛНОВОД.**

Чернышев Павел Алексеевич<sup>(1)</sup>, Халикова Камила Касимовна<sup>(2)</sup>

*Студент 6 курса<sup>(1)</sup>, студентка 3 курса<sup>(2)</sup>,*

*Кафедра «Литейные технологии»*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана.*

*Научный руководитель: В.А. Рыбкин,*

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные технологии»*

Модернизация существующих и создание новых машин и приборов потребовало разработки деталей сложной конфигурации, к которым предъявляются высокие требования точности их размеров. К таким деталям относятся разнообразные по конструкции волноводные узлы, используемые главным образом в радиоэлектронной промышленности. Волноводы представляют собой тонкостенные детали со сложной конфигурацией внутренних каналов. Основным показателем качества волноводов является точность размеров каналов.

Существующие способы изготовления сложных волноводных узлов - гальванопластика или гибка специальных профилей с последующей пайкой характеризуется низкой эффективностью. Одним из перспективных процессов изготовления волноводов является литье. Среди многообразия современных способов литья, литье по выплавляемым моделям занимает особое положение в связи с главной его особенностью - возможностью изготовления из разнообразных сплавов отливок сложной конфигурации. Литьем по выплавляемым моделям изготавливают отливки с высокой плотностью металла, шероховатостью поверхности Rz 20 ... 10 и менее. Однако значительная часть отливок ( ~ 78%) имеет точность размеров по 14 ... 17 квалитетам СТ СЭВ 144-75. Недостаточная точность размеров отливок снижает эффективность данного способа литья и увеличивает сроки освоения.

Решение задачи повышения точности размеров отливок волноводного класса, изготовленных по выплавляемым моделям, является актуальной, так как способствует улучшению служебных характеристик радиоэлектронной аппаратуры, является резервом повышения производительности труда за счет устранения механической обработки сложных по конфигурации каналов волноводов.

Целью настоящей работы является повышение точности размеров отливок из алюминиевых сплавов по выплавляемым моделям деталей радиоаппаратуры.

Процесс литья по выплавляемым моделям включает два основных этапа: изготовление модели в разъемной пресс-форме и изготовление отливки в неразъемной форме. От 40 до 70% погрешностей размеров отливок приходится на этап изготовления выплавляемых моделей. В МГТУ им.Н.Э.Баумана был разработан технологический процесс изготовления моделей с повышенной точностью размеров. Этот способ позволил значительно снизить и стабилизировать усадку моделей. Точность размеров таких моделей соответствует 9-11 квалитетам СТ СЭВ 144-75, что значительно повышает точность размеров отливок, изготовленных по выплавляемым моделям. Данный способ защищен авторским свидетельством и внедрен в производство.

Однако доля погрешностей размеров отливок, возникающих вследствие неучтенных изменений размеров формы литья по выплавляемым моделям, остается существенной, а причины, вызывавшие возникновение погрешностей размеров отливок, в достаточной степени не изучены. Отсутствие экспериментальных данных по формированию размеров отливок в формах литья по выплавляемым моделям, вызывает затруднения при изготовлении отливок с заданной точностью размеров, правильном назначении размеров рабочей полости пресс-форм.

Целью настоящей работы является повышение точности размеров отливок из алюминиевых сплавов по выплавляемым моделям деталей радиоаппаратуры.

### **Отливка типа “Волновод”**

Сплав: АЛ9

Масса: 147г

Габариты: 65x54x54 мм

Производство: серийное

Точность размеров каналов: 10..12 квалитет СТ СЭВ 144-75

Шероховатость поверхности: Ra=2,5 мм

### **Технологические режимы**

Температура заливки 710□

Нагрев формы до 650±50□

Заливка формы при 200±10□

Состав формы:

Этилселикат 40

Маршалит

Кварцевый песок 02, 0315

Поваренная соль 02

Для модели сод. Воздуха 35±1%

Размер пор 50 мкм  
Давл. Запрессовки состава  $0,25 \pm 0,01$  Мпа  
Температура запрессовки  $56 \pm 1^\circ$ .

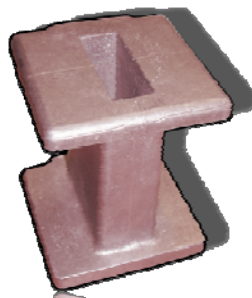


Рис.1 Волновод

### **Проблемы, возникающие при изготовлении отливки**

В производстве литых волноводов чаще используют способы литья под давлением и по выплавляемым моделям. Литьем под давлением получают волноводы типа уголков, тройников, двойных тройников. Достигаемая шероховатость поверхности волноводов может составлять  $R_a = 2,5$  мкм. Однако отдельные места поверхности отливок не удовлетворяют требованиям из-за специфического дефекта - "мороза". К недостаткам этого способа также следует отнести ограничение по сложности конфигурации отливок, наличке пористости в отливках, невозможность изготовления отливок волноводов без уклонов по внутреннему каналу. Все это ограничивает область применения данного способа.

Способ литья по выплавляемым моделям позволяет изготавливать отливки с высокой плотностью металла, малой толщиной стенок от 1 до 2 мм, шероховатостью поверхности  $R_a = 2,5$  мкм, точностью размеров по 12 ... 13 квалитетам СТ СЭВ 144-1, а так же отливки, обладающие специальными свойствами (прочностью, вакуумплотностью, высокой электропроводностью и т.д.). В настоящее время в промышленности применяется два варианта технологического процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям: литье в гипсовые (облочные) формы и литье в неразъемные формы. Однако эти процессы в существующем виде не полностью удовлетворяют требованиям достижения высокой точности размеров отливок. В наибольшей степени это относится к варианту литья в гипсовые формы.

Действительная точность размеров отливок изменяется в широких пределах от 12 до 17 квалитета СТ СЭВ 144-75, при этом только 6% отливок изготавливаются по 12 квалитету СТ СЭВ 144-75.

Таким образом проблемы можно свести к:

- Обеспечение точности отклонения канала  $0,05$  мм при реально получаемыми  $0,2 - 0,3$  мм по ОСТ 92-1554-73

- Решение теплосиловой задачи взаимодействия моделей отливка-форма, форма-расплав для установления необходимых размеров

- Получение отливки, удовлетворяющей предъявленным требованиям без дорнирования или калибровки размера канала.

Для достижения цели, поставленной в работе, решалась научная задача, заключающаяся в установлении закономерностей влияния

физических свойств материалов формы и отливки, технологических режимов прокаливания, заливки, охлаждения отливки на формирование

действительных размеров отливок и их отклонений. Была создана программа в объектно-ориентированной среде Delphi, разработан графический интерфейс, представлена наглядная визуализация данных.

### Описание работы программы

## Блок схема



Рис.2 Блок схема программы «Допуск»

Результатом работы программы является полученный конечный размер после охлаждения отливки, опираясь на который мы можем определить необходимый размер пресс-формы для удовлетворения конструкторских требований по точности. Программа имеет широкое применение и может быть использовано для расчета отверстий аналогичной простой конфигурации любых сплавов для любого метода литья.

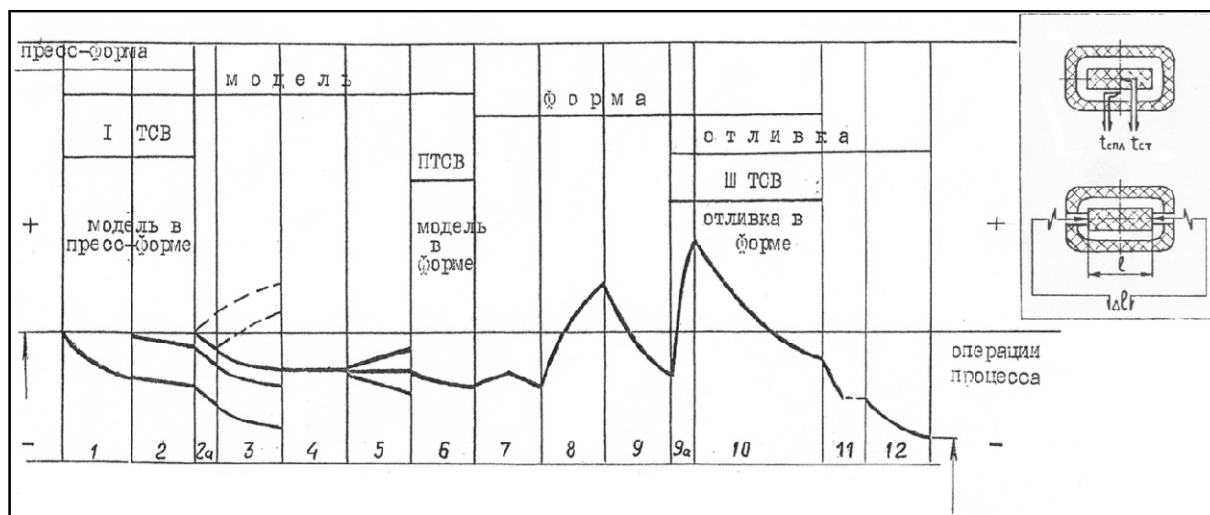


Рис.3 Результат работы программы

По данной схеме формирования размеров отливок ЛВМ можно определить интересующий нас размер пресс-формы.

В рамках данного проекта была разработана программа в объектно-ориентированной среде Delphi, способная произвести расчет заданного размера отливки после затвердевания и усадки. На основании этих данных возможно определение номинального размера детали и оптимального отклонения размера канала. Конечно, даже имея на руках необходимый размер пресс-формы для получения таких жестких конструкторских требований требуется соблюдать еще множество требований, таких как содержания воздуха в моделях и жесткие температурные режимы. Только в таком случае можно получить волновод, не требующий дорнирования, либо калибровки размера радара.

### Литература

1. Шкленник Я.И., Озеров В.А. Инженерная монография ЛВМ, издание 2-е. М.: Машгиз.
2. Трухов А.П., Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. М.: Академия, 2004.
3. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки, т.1, II. М.: Машиностроение, 1979.
4. Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф. Цветное литье. Справочник. М.: Машиностроение, 1989.
5. Трухов А.П., Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. М.: Академия, 2004.
6. John Campbell «The 10 rules of castings», published by Elsevier Ltd., 2004
7. John Campbell «The new metallurgy of cast metals» second edition, published by Elsevier Ltd., 2003.

**Секция 6**  
**Оборудование и технологии обработки давлением**

УДК 621.7.043

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК.**

Акопова Тамара Артуровна

*Студент 5 курса, магистр 2 года,  
кафедра «Системы пластического деформирования»  
Московский государственный технологический университет «Станкин»*

*Научный руководитель: А. Э. Артес,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Системы пластического деформирования»*

Исследование технологических возможностей штамповки определенной номенклатуры изделий из трубных заготовок является одним из решений, применительно к проблеме внедрения энерго-ресурсосберегающих технологий

Холодная объемная штамповка деталей из трубных заготовок является перспективной технологией, с помощью которой можно получать ряд поверхностей поковок, не требующих дальнейшей механической обработки. На кафедре СПД МГТУ «Станкин», по просьбе Харьковского завода ГПЗ 8, была разработана технология выдавливания полых роликов подшипников с использованием плавающих оправок [1]. При этом планировалось, что полуфабрикат (исходная заготовка в форме втулки с наружным диаметром  $d=42$  мм, с толщиной стенки  $s=10$  мм и высотой  $H=38$  мм) необходимо получать на горячештамповочном гайко-высадочном автомате. Конструкция ОАО «Тяжпрессмаш», (г. Рязань). Окончательно штамповка выдавливанием полых роликов на плавающих оправках, ведется после отжига, отчистки и покрытия цинко-фосфатным слоем в специальном прессе-автомате. Однако для мелкосерийного и серийного производства вполне рентабельной может быть технология обжима штучных заготовок, полученных методом отрезки на лентопильных станках.[2, 3]. Немногочисленные исследования в области пластического формоизменения трубных заготовок [4] показали возможность и необходимость развития малоотходных технологий изготовления деталей из трубных заготовок.

Целью работы является разработка технологического процесса изготовления полых роликов подшипников, из трубных заготовок и его экспериментальная проверка.

Изготовление деталей удлиненной формы базируется на использовании трех основных операций: обжима, раздачи и высадки.



Данные для разрабатываемого процесса - необходимо получить полый ролик наружным диаметром  $d_k=34$  мм, высотой  $H_k=52+1$  мм, с припуском для обработки торцов и внутренним диаметром  $d_{k.в.} \leq 11,5$  мм, с дальнейшей расточкой диаметра отверстия до 12 мм. Материал заготовок – сталь ШХ15, твердостью 185 НВ (после отжига).

Нами для изготовления ролика применена труба наружным диаметром  $d_n=42$  мм, и внутренним диаметром  $d_{н.в.}=22$  мм. Высота штучной заготовки принята равной  $H=44$  мм (рис.1).

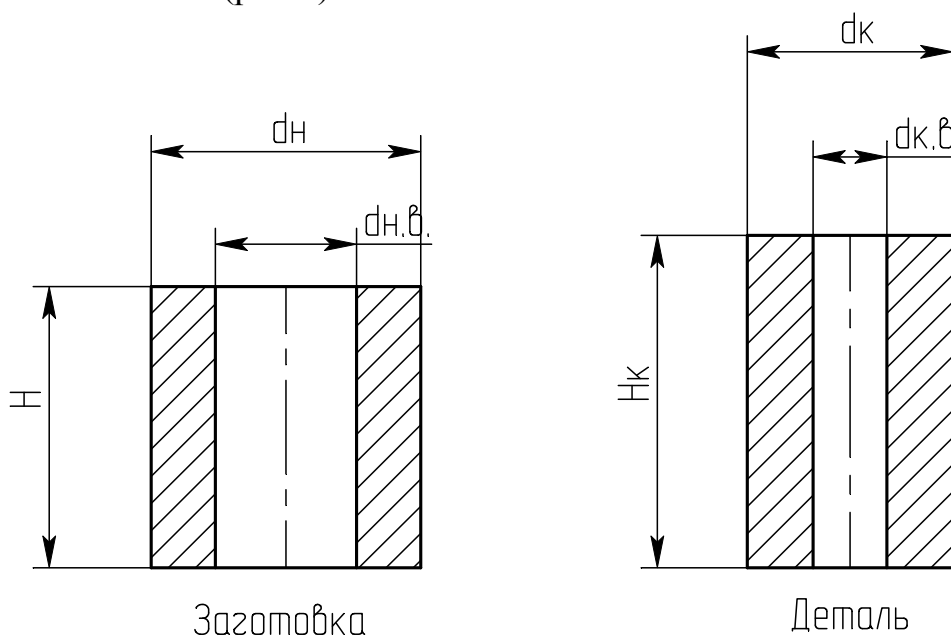


Рис.1 Эскизы заготовки и детали (ролика)

При этом исходная трубная заготовка  $\varnothing 42 \times 10$  по ГОСТ 8732-78 имела разностенность более 5%.

На заготовки, отрезанные на лентопильном станке, предварительно наносили цинко-фосфатное покрытие для предотвращения адгезии металла заготовки с инструментом. Обжим заготовки осуществляется по схеме, представленной на рис.2. Эксперимент проводился на испытательной машине типа EU100, усилием  $P_{max}=1000$  кН.

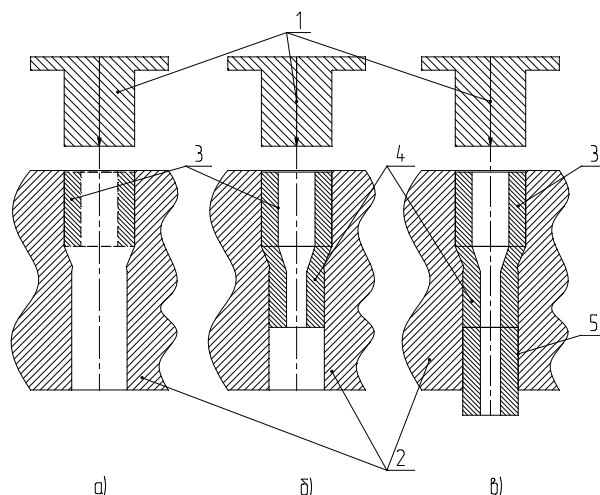


Рис.2. 1-пуансон; 2-матрица; 3, 4,-деформируемые заготовки, 5-готовая поковка (деталь)

Первая деталь обжималась за три хода ползуна пресса, последующие детали – за четвертый и все последующие ходы.

Трубные заготовки 3 устанавливались в матрицу во время подъема ползуна пресса вверх (рис.2, а). Деформация заготовки начинается при соприкосновении торца пуансона 1 с заготовкой 3. При установке второй и последующих заготовок, предыдущая обжимается в матрице (рис.2,б) и продолжается процесс проталкивания (рис.2, в).

Предлагаемый способ обжима может быть реализован на кривошипно-коленных прессах для холодного деформирования или на гидравлических прессах.

В лаборатории кафедры СПД МГТУ «Станкин» были поставлены эксперименты по описанной выше технологии.

Измерение сил деформирования показало, что при обжиге трубой заготовки с  $d_n=42$  мм до диаметра  $d_k=34$  мм сила составила 620 кН (через матрицу проталкивали и обжимали только одну заготовку, с использованием пуансона  $\varnothing 32$  мм).

В процессе обжима (по схеме рис.2,в) первой заготовки суммарная сила составила 860 кН. На рис.3 показан график изменения силы при обжиге заготовок на испытательной машине, тип EU100,

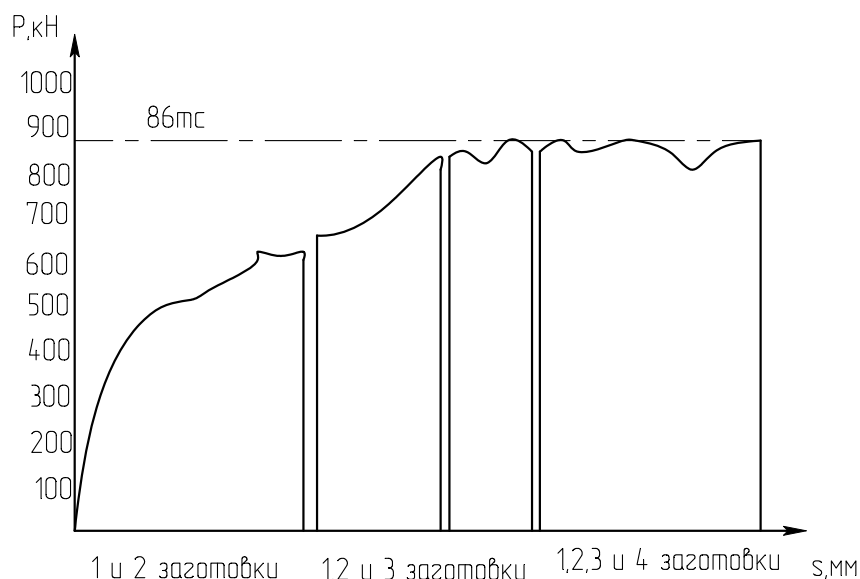


Рис. 3. График изменения усилия при обжиге

Из поставленного опыта видно, что необходимая сила для получения ролика с нужными размерами по разработанной нами схеме потребует сила равная 86 тс. Требуются дополнительные исследования для проверки разрабатываемой математической модели, описанной ниже, и создания штампового инструмента с определенной геометрией, например с учетом угла захода матрицы, для уменьшения силы обжима и конструирования калибрующего пояса матрицы

Расчет силы при обжиге заготовки с  $d_n=42$  мм до  $d_k=34$  мм в матрице ведется по методике Е. А. Попова [5].

Безразмерная величина  $\frac{q_o}{\sigma_s}$ , где  $q_o$  – удельная сила обжима,  $\sigma_s$  – напряжение текучести с учетом упрочнения, вычисляется по формуле

$$\frac{q_o}{\sigma_s} = (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \left( 1 - \frac{d_k}{d_n} \right) \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол захода матрицы;  $d_n, d_k$  – начальный диаметр заготовки, конечный диаметр поковки соответственно.

В нашем случае численное значение относительной степени деформации  $\varepsilon \approx 0,34$ .

При проведении эксперимента учитывались, по литературным данным [6], параметры диаграммы пластичности для стали ШХ15 (рис.3) и кривой упрочнения (рис.4).

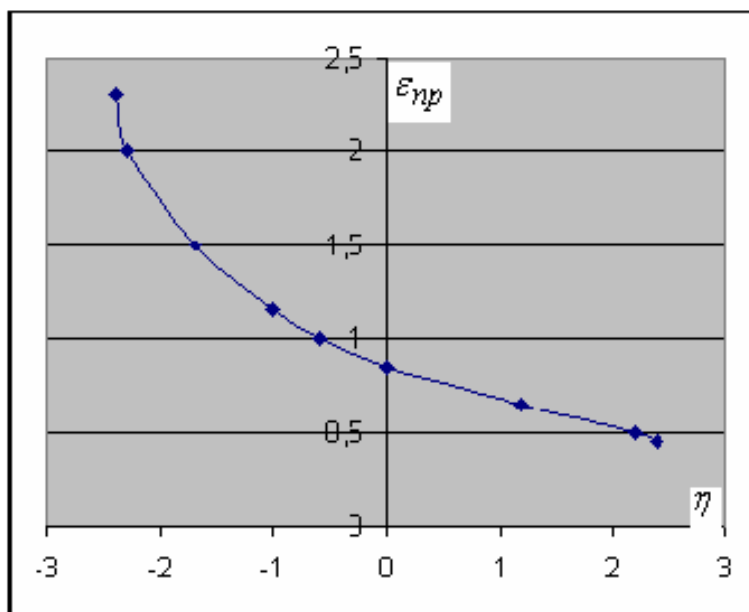


Рис.3 Диаграмма пластичности для стали ШХ15

На диаграмме рис.3 показана зависимость  $\varepsilon_{np} = \varepsilon_{np}(\eta)$ , где  $\varepsilon_{np}$  – предельная деформация (при растяжении, сжатии и кручении),  $\eta$  – показатель напряженного состояния.

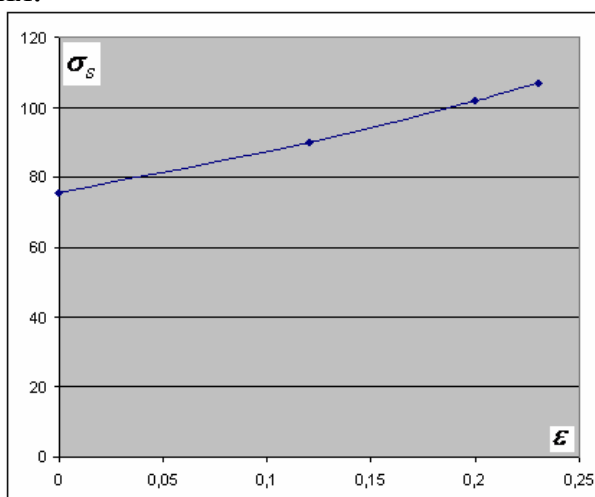


Рис.4 Кривая упрочнения для стали ШХ15

На диаграмме рис.4 показана зависимость  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_0)$ , где  $\sigma_s$  – напряжение, возникшее при осадке кольцевой заготовки,  $\varepsilon_0$  – степень деформации при осадке кольцевых заготовок.

Кривая упрочнения были так же получены в лаборатории кафедры методом осадки, на гидравлическом прессе 2500 кН, трех заготовок  $\varnothing 42 \times 10$ , с начальной высоты  $H = 17$  мм, до конечной  $H_1 = 13$  мм,  $H_2 = 9$  мм,  $H_3 = 7$  мм. После каждой осадки измеряли твердость кольцевых заготовок по Бринеллю

С учетом этих данных была проведена экспериментальная штамповка полого ролика подшипника. Штамповка проводилась в разработанном

экспериментальном штампе, на испытательной машине, настроенной на максимальное усилие 1000 кН. На рис.5 показаны результаты штамповки.



Рис.5 Результаты экспериментальной штамповки. Слева направо: 1-начальная заготовка, покрытая цинк-фосфатным слоем, 2-полуфабрикат в стадии обжима, 3,4-полученные детали

Размеры полученных деталей совпадают с размерами в поставленной задаче, что подтверждает возможность разработанного технологического процесса. В результате упрочнения твердость поковок составила  $\approx 285$  НВ.

### Выводы

Полученные холодной штамповкой полые ролики не требуют лезвийной обработки по наружному диаметру. Обрабатываются только припуски с торцов, и ведется расточка до нужного размера диаметра отверстия. При относительно высокой для шарикоподшипниковой стали ШХ15 относительно степени деформации следует для роликов буксовых подшипников использовать более пластичную сталь ШХ4.

Технологические возможности обжима трубчатых изделий по описанной технологии требуют дальнейших исследований. На данный момент представленные разработки являются предпроектными исследованиями

## Литература

1. *Артес А. Э., Серов Е. С., Третьюхин В. В., Гуреева Т. В.* Разработка технологических процессов холодного выдавливания трубчатых изделий// КШП. ОМД. 2009. №6. С. 27-30.
2. *Артес А. Э.* Технологические процессы изготовления поволоков из трубных заготовок// КШП. ОМД. 2003. №11. С. 31-35; № 12. С. 31-35.
3. *Артес А. Э.* Трубные заготовки для пластического деформирования// Машиностроение: Энциклопедия. Т. III-2. М. Машиностроение, 1996. С. 24-26.
4. *Акаро И. Л. Троицкий В. П.* Исследование операций обжима толстостенных труб в жестких матрицах// КШП. ОМД. 2000. №11. С.1-11.
5. *Попов Е. А.* Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: МГТУ им. Баумана. 2003, стр.156-162
6. *Субич В. Н., Шестаков Н. А., Демин В. А., Власов А. В.* Расчет и проектирование процессов объемной и листовой штамповки. М.: МГИУ, 2007. -414 с., стр. 85-89.
7. *Друянов Б.А.* Теория технологической пластичности. М.: Машиностроение. 1990, стр. 159
8. *Ковка и штамповка. Справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка.* М.: Машиностроение, 1987. 544 с.

УДК 621.762.4.04

## **ПРИМЕНЕНИЕ РКУ - ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ГРАНУЛ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Алеева Эльвира Рашитовна

*Студент 5 курса*

*Кафедра «Обработка материалов давлением»*

*ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева»*

*Научный руководитель: Первов М. Л.*

*Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением»*

Изготовление деформированных полуфабрикатов из гранул включает следующие основные этапы: изготовление гранул, их дегазация, последующее брикетирование и прессование. Для получения требуемых свойств полуфабрикатов прессование проводят с большими степенями деформации. При увеличении деформации прочностные свойства полуфабриката увеличиваются, и при коэффициенте вытяжки более 30 полуфабрикат становится практически изотропным [1].

Для изготовления паяных конструкций находят применение композиционные припои, изготовленные из смеси гранул основы и наполнителя. В качестве основы используют гранулы припоя, а в качестве наполнителя гранулы сплава с высокой пластичностью [2]. Образование каркасной структуры (гранулы наполнителя обволакивают гранулы припоя) изменяет напряженно-деформированное состояние гранул припоя, повышая тем самым его пластичность. Формирование каркасной структуры происходит на стадии брикетирования и последующего прессования смеси гранул [3]. Прочность брикета не позволяет использовать его как самостоятельный полуфабрикат из-за низкой прочности и низкой пластичности. Для увеличения прочности и пластичности композиционного материала из него прессуют полосу или прутки.

В последнее время широкое применение находит метод равноканального углового прессования (РКУ-прессование) для получения металлов и сплавов с заданной структурой. Использование интенсивных деформаций возникающих при РКУ-прессовании может быть успешно использовано для создания структуры и заданных свойств композиционного материала.

Эксперименты по влиянию РКУ-прессования на свойства брикетов проводили на брикетах композиционного материала состоящего из гранул

сплава 1379 (основа) и гранул технически чистого алюминия АД0 (наполнитель). Гранулы основы и наполнителя смешивали в пропорциях 70% и 30% (по массе) соответственно и из полученной смеси изготавливали брикеты диаметром 20 мм и высотой 20-25 мм. РКУ-прессование брикетов из смеси гранул проводили в матрице представленной на рис. 1.



Рис. 1 Матрицы для проведения РКУ прессования

Диаметр входного отверстия составлял 20 мм, каналы пересекаются под углом 90° и диаметр выходного отверстия 19,5 мм. Матрица вставляется в обойму (рис. 2).

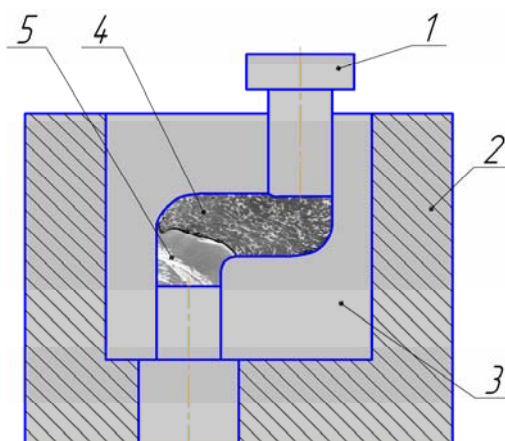


Рис. 2– Оснастка для РКУ прессования брикета: 1- пуансон; 2- контейнер; 3- матрица; 4- брикет; 5- подпор.

РКУ-прессование проводили следующим образом: в печи нагревали оснастку и брикет до температуры проведения РКУ-прессования, затем извлекали оснастку из печи и устанавливали на гидравлическом прессе, загружали образец и выполняли прессование. Затем вставляли следующий образец и проводили следующий этап прессования. По мере выхода образцов из матрицы их возвращали на повторное прессование. Количество проходов составляло от одного до семи. После охлаждения оснастки делали её подогрев. Смазку каналов осуществляли после каждого прессования брикета.

На образцах после РКУ-прессования исследовали структуру и определяли их прочностные свойства брикетов.



Исследование влияния температуры РКУ-прессования брикетов показали, что до температуры 420 °С разрушаются связи между гранулами, образовавшимися при брикетировании. Разрушенные связи в процессе РКУ-прессования не восстанавливаются, и брикет разрушается (рис. 3). Повторное прессование таких брикетов было невозможно.

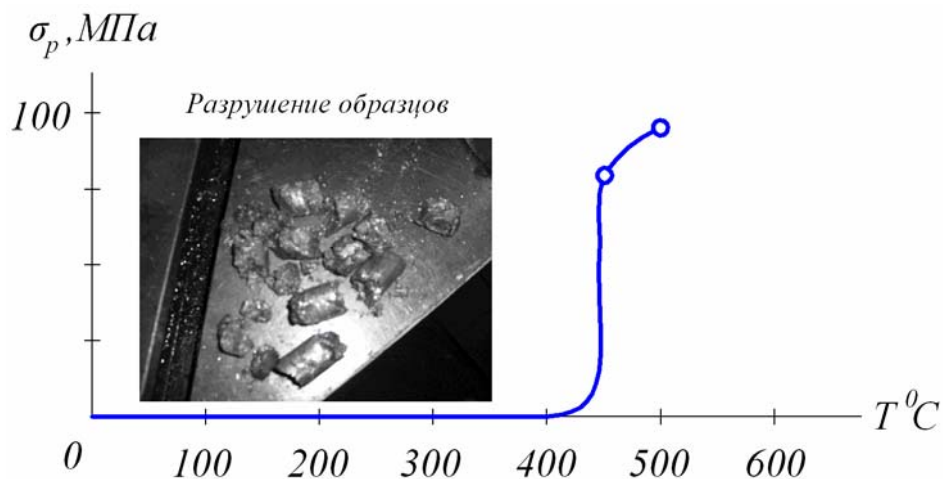


Рис. 3 Зависимость напряжения разрушения брикета  $\sigma_p$  от температуры РКУ-прессования

При дальнейшем повышении температуры РКУ-прессования повышается прочность брикета. Однако после первого прохода прочность брикета падает и, начиная со второго прохода, растёт. При РКУ-прессовании слабые связи между гранулами основы нарушаются, и между ними затекает наполнитель, имеющий более низкое значение напряжения текучести (рис. 4 и 5). Увеличение температуры РКУ-прессования до 500 °С приводит к дальнейшему повышению прочности брикета и к росту кристаллов кремния при температуре РКУ-прессования выше 500 °С (рис. 6), что нежелательно. Полученные зависимости представлены на рис. 7.

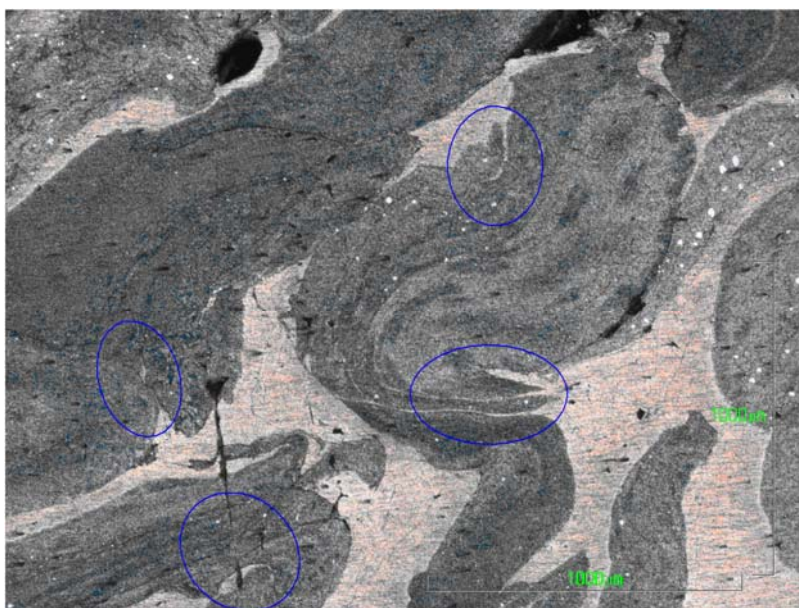


Рис. 4 Микроструктура брикета (70%1379+30%АД0) после РКУ прессования,  $t=450^{\circ}\text{C}$ , 3 прохода, увел. 50

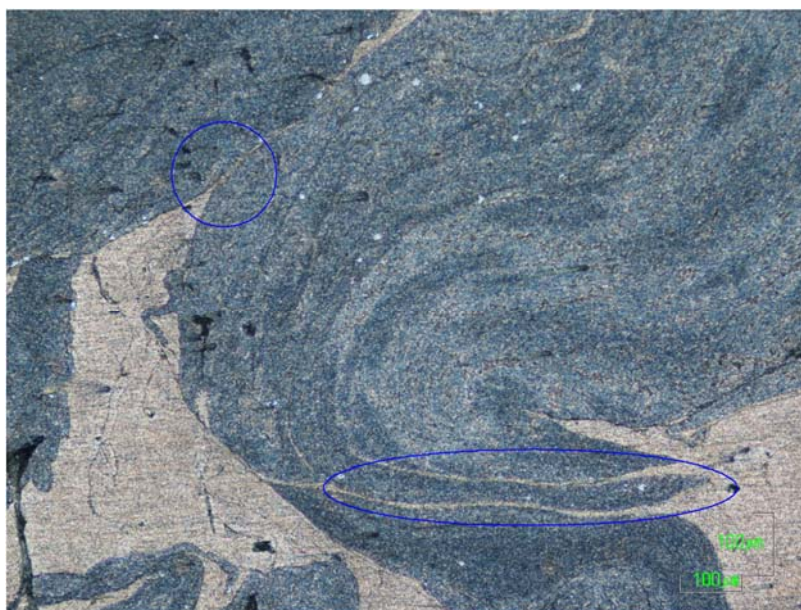


Рис. 5 Микроструктура брикета (70%1379+30%АД0) после РКУ прессования,  $t=450^{\circ}\text{C}$ , 3 прохода, увел. 100



Рис. 6 Микроструктура брикета (70%1379+30%АД0) после РКУ прессования,  $t=500^{\circ}\text{C}$ , 1 проход, увел. 1000

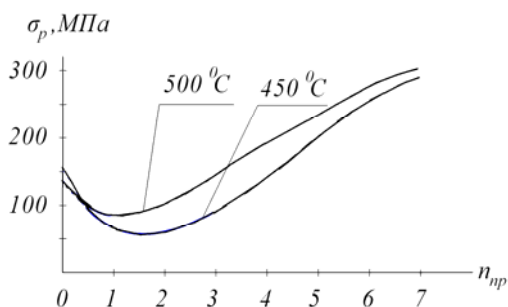


Рис. 7 Зависимость напряжения разрушения брикета ( $\sigma_p$ ) от количества проходов при РКУ-прессовании ( $n_{np}$ )

РКУ-прессование приводит к равномерному распределению наполнителя в композиционном материале. Равномерность распределения наполнителя оценивали по количеству пересечений линиями границ основа - наполнитель. Для расчета количества пересечений на фотографию структуры брикета наносили горизонтальные, вертикальные и диагональные линии и рассчитывали среднее количество пересечений границ раздела на длине 1 см. Методика определения количества пересечений поясняется на рис. 8.

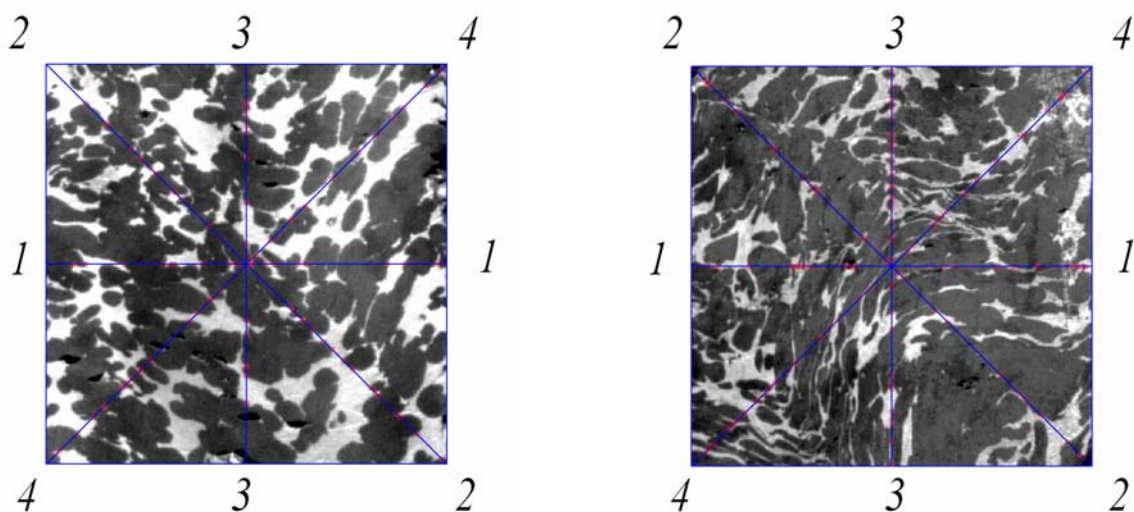


Рис. 8 Определение количества пересечений наполнителя и основы при РКУ – прессовании, а -  $t=450^{\circ}\text{C}$ , 1 проход, б -  $t=450^{\circ}\text{C}$ , 3 прохода

Зависимость количества пересечений в зависимости от количества проходов при РКУ прессовании  $n_{np}$  представлена на рис. 9.

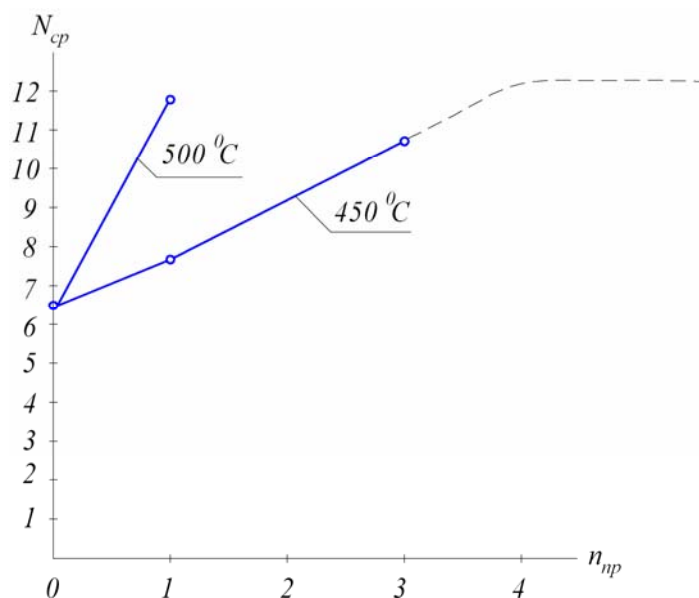


Рис. 9 Зависимость среднего числа пересечений  $N_{cp}$  от количества проходов  $n_{np}$  при РКУ прессовании

Количество пересечений увеличивается с увеличением количества проходов и обеспечивает равномерное распределение наполнителя по сечению заготовки.

### Литература

- 1 Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справ. изд. /Балахонцев Г.А., Барбанель Р.И., Бондарев Б.И. и др./ 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1985. 352 с.
- 2 А.с. СССР №1413824. В.Ю. Конкевич, А.Н. Волчков, М.Л. Первов, В.М. Фёдоров, В.М. Сальников, В.Л. Гришин, В.К. Король, О.И. Качайник, Е.И. Чулков. Композиционный материал.
- 3 М.Л. Первов, В.Ю. Конкевич «Пути повышения пластичности эвтектических сплавов алюминия»//Кузнечно-штамповочное производство.- №8.-2006.-С.31-33.

УДК 621.77.4:621.762.4

## **ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЖИДКОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ**

Артёмов Фёдор Евгеньевич<sup>(1)</sup>, Бондаренко Александр Константинович<sup>(2)</sup>,  
Жанзаков Павел Кабдукалиевич<sup>(3)</sup>

*Инженер-технолог<sup>(1)</sup>, Инженер-технолог<sup>(2)</sup>, Инженер-технолог Зк<sup>(3)</sup>*

*Отдел обработки металлов давлением*

*Научно-исследовательский институт технологии и организации  
производства двигателей*

*Научный руководитель: И.А.Бурлаков,*

*доктор технических наук, начальник отдела обработки металлов давлением*

Неразъемное соединение – соединение деталей и узлов, разборка которого невозможна без повреждения деталей. Неразъемные соединения используют для получения деталей сложной формы и геометрии. К неразъемным соединениям относят сварные, паяные, заклепочные, клеевые и др. соединения. В настоящее время наиболее остро стоит проблема получения неразъемного соединения заготовок из гранульных (порошковых) материалов.

Порошковая металлургия занимает видное место в современном научно-техническом прогрессе благодаря целому ряду важных достоинств технико-экономического характера. Она позволяет не только значительно экономить металл и снижать себестоимость продукции, но и создавать сложные композиционные материалы с уникальным сочетанием свойств.

Вместе с тем нельзя не отметить, что далеко не все проблемы технологического характера в порошковой металлургии можно считать решенными. Некоторые виды изделий, изготовленные этим методом, оказываются недостаточно прочными, что является едва ли не главным препятствием для расширения влияния этого производства.

Устранение или уменьшение пористости и улучшение физико-механических свойств изделий должно способствовать расширению номенклатуры изделий, изготавливаемых методом порошковой металлургии. В связи с этим исследование процессов и возможностей получения неразъемных соединений, определяющих конечный уровень свойств изделий, в настоящее время является актуальной задачей.

### **Характеристика материала ЭП741НП**

В настоящее время в России существует несколько жаропрочных никелевых сплавов, которые иногда именуется «гранульными». Это ЭП741НП, ЭП741П, ЭП975, ЭП962, ВЖ136. Наиболее распространен сплав ЭП741НП, из которого изготавливаются диски газотурбинных двигателей (ГТД), химический состав которого приведен в таблице 1.

**Таблица 1. Химический состав порошкового жаропрочного сплава ЭП741НП**

Основные элементы, % масс.									
Ni	C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	W	Nb	Hf
осно ва	0,066	8,0- 10,0	15,0- 16,5	3,5- 4,2	4,85- 5,25	1,6- 2,0	5,2- 5,9	2,4- 2,8	0,1- 0,4
Примеси, не более, % масс									
Zr	Mg	B	Ge	Si	Mn	Fe	S	P	
0,015	0,05	0,015	0,01	0,5	0,5	0,5	0,009	0.015	

Как правило, данный сплав производится с гранулометрическим составом 50 ... 160 мкм [1]. На рисунке 1 показан фрагмент поверхности гранулы, закристаллизованной со скоростью охлаждения  $9 \cdot 10^6$  К°/сек., а на рисунке 2 – общий вид гранул.

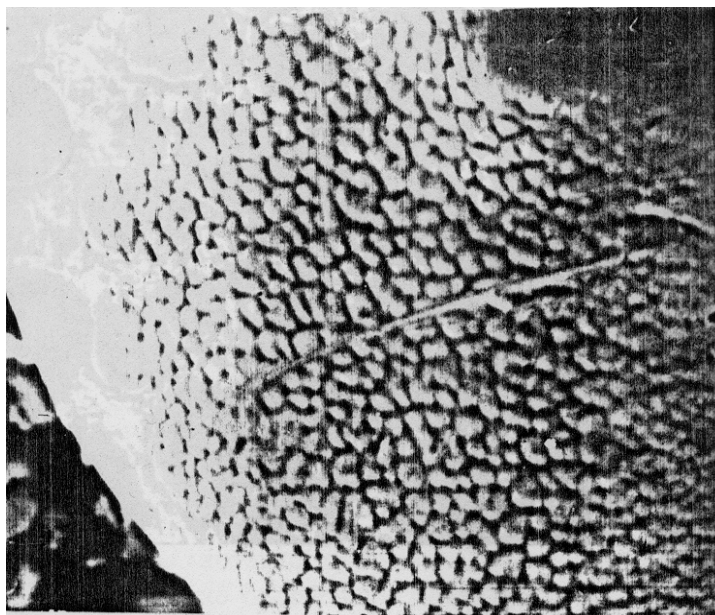


Рис.1 Фрагмент поверхности гранулы ЭП741НП (x 6000мкм)

Дифференциально-термический анализ показал, что у всех сплавов существует температурный диапазон появления в них жидкой фазы, состав которой для сплава ЭП741НП отвечает сплаву упрочняющей  $\gamma'$  фазы. Появление жидкой фазы на гранулах показано на рисунке 3.

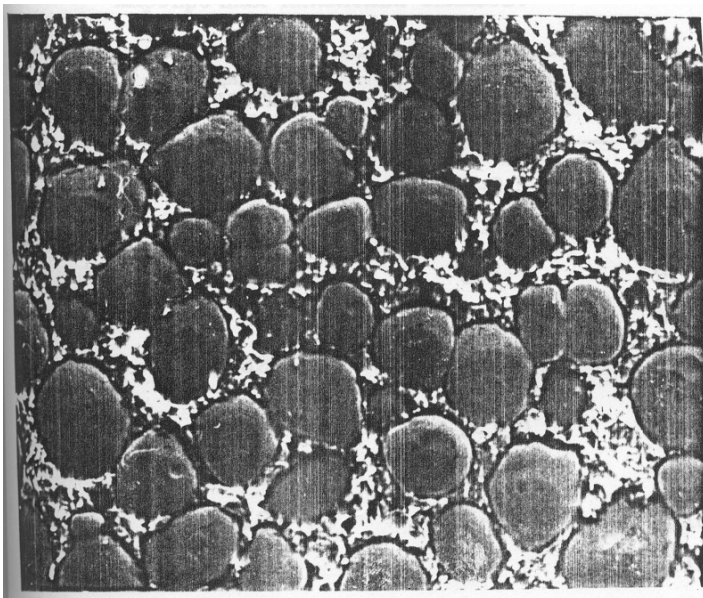


Рис.2 Общий вид гранул ЭП741НП (x 150мкм)

Помещенные в керамическую или металлическую форму гранулы при достижении температуры  $T_s+T_p$ , где  $T_s$ - температура солидуса сплава, а  $T_p$  - температура перегрева, компактируются. Если засыпка гранул подверглась горячему изостатическому прессованию (ГИП), то во время появления жидкой фазы происходит изменения структуры, а жидкая фаза появляется не только в объеме изделия, но и на его поверхности.



Рис.3 Закристаллизованная жидкая фаза на грануле сплава ЭП741НП (x 500мкм)

При соприкосновении двух поверхностей (двух деталей) жидкая фаза согласно общей теории спекания порошковых систем перемещается в зону контакта. После охлаждения жидкая фаза кристаллизуется, детали охлаждаются. Специальная термообработка меняет структуру соединяющего шва, приближая его химический состав к  $\gamma$  – твердому раствору.

## **Сущность и технические задачи жидкофазного спекания. Виды жидкофазного спекания**

Спекание – это термически активируемый, самопроизвольный или инициируемый внешним воздействием переход системы контактирующих твердых тел или пористой среды в термодинамически более равномерное состояние путем уменьшения площади свободной поверхности [1].

В тоже время представления о спекании, как о процессе стремления системы с развитой свободной поверхностью к термодинамическому равновесию не являются исчерпывающими. Они должны быть дополнены понятием спекания как целенаправленного структурообразующего процесса в технологии получения поликристаллических материалов из порошков.

Процесс спекания порошковых материалов подразделяют на следующие стадии:

- образование связей между частицами;
- рост контактов (“шеек”)
- закрытие сквозной пористости;
- сфероидизация пор;
- усадка за счет уменьшения объема пор;
- коалесценция пор.

Следует отметить, что все вышеперечисленные стадии не проходят строго последовательно одна после другой. Жидкофазное спекание один из основных процессов в порошковой металлургии. Как технологическая операция, спекание имеет вполне однозначное и четкое значение – придание телам определенной структуры и соответствующих механических, физических и физико-химических свойств.

Термодинамическим условием самопроизвольного жидкофазного спекания многокомпонентных систем является стремление системы к равновесию. При жидкофазном спекании благодаря большей подвижности системы более наглядно выглядит проявление действия основных движущих сил объемного уплотнения – сил капиллярного стягивания, более активно протекают процессы перегруппировки элементов структуры и локализации уплотнения. Интенсивно протекают процессы гетеродиффузии, растворения и осаждения, что приводит к ускорению сплавообразования и объемного уплотнения [2].

### **Экспериментальная часть**

Разработка теории и практики использования жидкой фазы в технологиях, связанных с гранулами жаропрочных сплавов, позволили начать поисковые исследования в области получения соединений из этих материалов. Было выяснено, что для этой цели необходимо тщательно готовить поверхности соединений (шлифовка, конструирование профиля, обезжиривание). Простая накладка образцов из контрольных колец сплава



ЭП741НП без создания даже минимального напряжения в области контакта не дает возможности получения непрерывного шва, однако метод перспективен.

В ходе исследовательской работы изучалась возможность получения неразъемного соединения несколькими методами, такими как:

**а) Получение неразъемного соединения с помощью метода жидкофазного спекания в вакуумной печи.**

Для этого эксперимента были изготовлены 2 образца прямоугольного сечения из сплава ЭП741НП. Поверхности образцов были отшлифованы на наждачном круге, после чего “обезжирены” спиртом. Для лучшего примыкания одной поверхности к другой образцы между собой были скручены нихромовой проволокой. После чего соединенные проволокой образцы были помещены в вакуумную печь. Глубина вакуума в печи составляет до  $10^{-4}$  мм. рт.ст. Температура нагрева 1230...1300°C. Время выдержки образцов в печи до 20 минут.

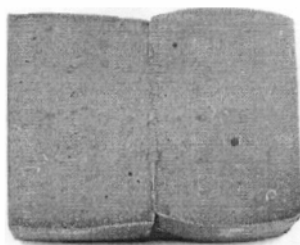


Рис.1 Образец после жидкофазного спекания

На отдельных участках образцов наблюдается соединение с диффузией материала. В материале в месте соединения образцов имеются отдельные поры размером 10...30 мкм. В середине соединения образцов выявлены окисные включения. Микроструктура материала сварных соединений образцов без оплавлений границ.

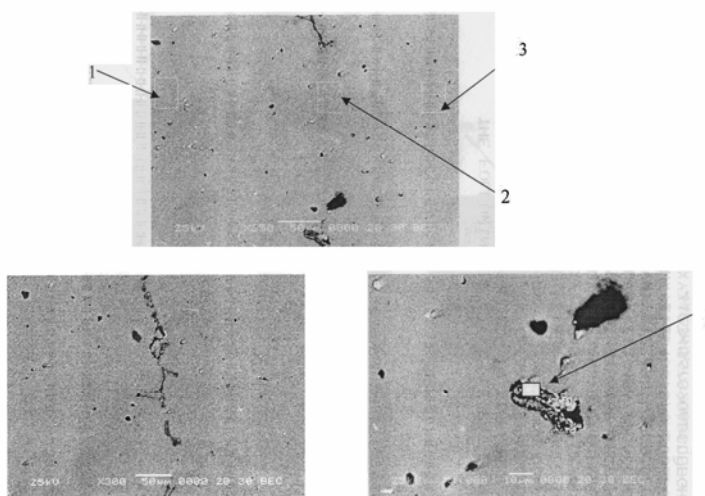


Рис. 2 Микроструктура образца после жидкофазного спекания(х350мкм)  
1-основной металл образца 1,2-сварной шов между образцами,3-основной металл образца 2, 4-середина сварного шва между образцами.

**б) Получение неразъемного соединения с помощью метода жидкофазного спекания в вакуумной печи соединением двух образцов через никелевую прокладку из сплава ЭП435.**

Для этого эксперимента были изготовлены 2 образца прямоугольного сечения из сплава ЭП741НП. Поверхности образцов были отшлифованы на наждачном круге, после чего “обезжирены” изопропиловым спиртом. Для лучшего соединения поверхностей между образцами была помещена прокладка из никелевой фольги ЭП435. Образцы между собой были скручены нихромовой проволокой. После чего соединенные проволокой образцы были помещены в вакуумную печь. Глубина вакуума в печи составляет до  $10^{-4}$  мм. рт.ст. Температура нагрева 1280...1330°C. Время выдержки образцов в печи до 20 минут.

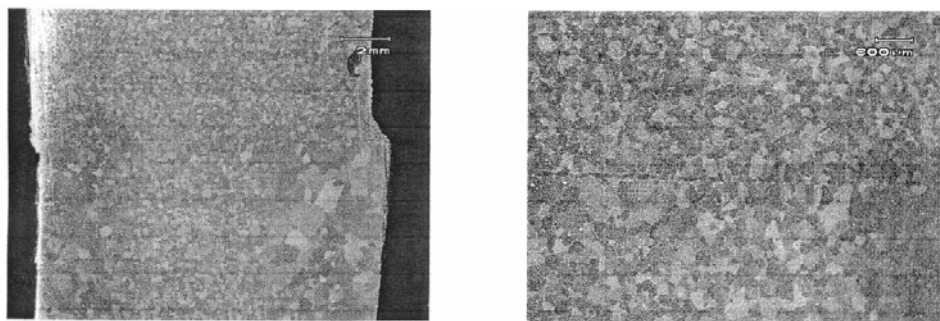


Рис. 3 Макро и микроструктура образца после жидкофазного спекания.(x2мм,x600мкм)

Исследованием макро и микроструктуры было установлено, что на соединенных образцах произошло полное соединение и диффузия материала прокладки и основного металла. С увеличением температуры отмечается рост зерна сплава ЭП741НП. Рентгеноспектральным анализом было установлено, что химический состав фаз в зоне соединения и в основном материале выравнился практически до одинакового значения. Плотность материала при нагреве увеличилась.

После исследования макро и микроструктуры из соединенных образцов были изготовлены образцы для испытания на удар. В результате испытания предел прочности на изгиб составил 201,7кг.

**в) Получение неразъемного соединения с помощью метода жидкофазного спекания в вакуумной печи электронным лучом.**

Для этого эксперимента были изготовлены 2 образца прямоугольного сечения из сплава ЭП741НП. Поверхности образцов были отшлифованы на наждачном круге, после чего “обезжирены” спиртом. Образцы между собой были скручены нихромовой проволокой. После чего соединенные проволокой образцы были помещены в вакуумную печь. Глубина вакуума в печи составляет до  $10^{-4}$  мм.рт.ст. Температура нагрева -1230...1280°C. Время

выдержки образцов в печи 5 минут. Контроль температуры осуществлялся с помощью термовизора. Так как точность измерения температуры термовизора составляет  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , для более точного измерения температуры термовизор был откалиброван с помощью термопары. Калибровка термовизора осуществлялась с помощью опытного образца, в котором высверливалось отверстие глубиной 1,5 мм для вставки термопары. Для фиксации термопары в образце применялся термоцемент марки Ф50. После чего образец нагревается и происходит калибровка термовизора.

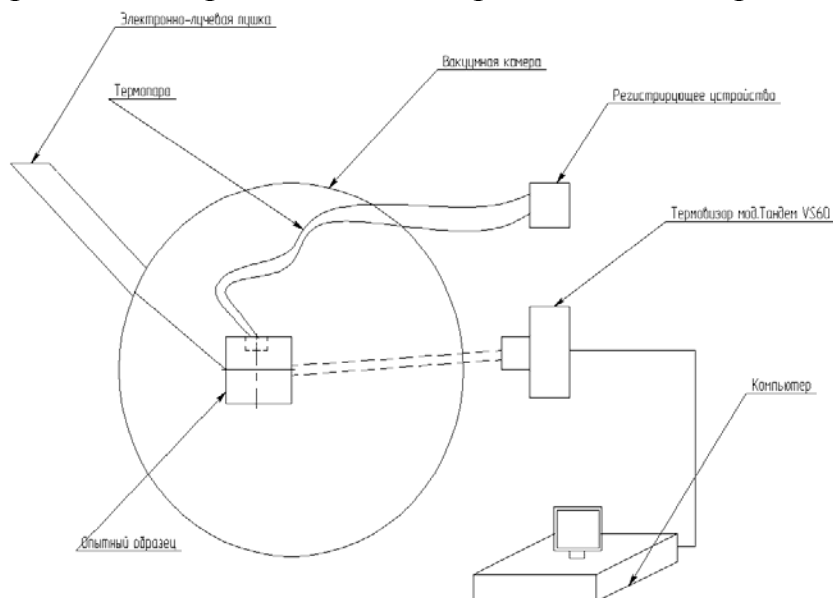


Рис.4 Схема калибровки термовизора с помощью термопары

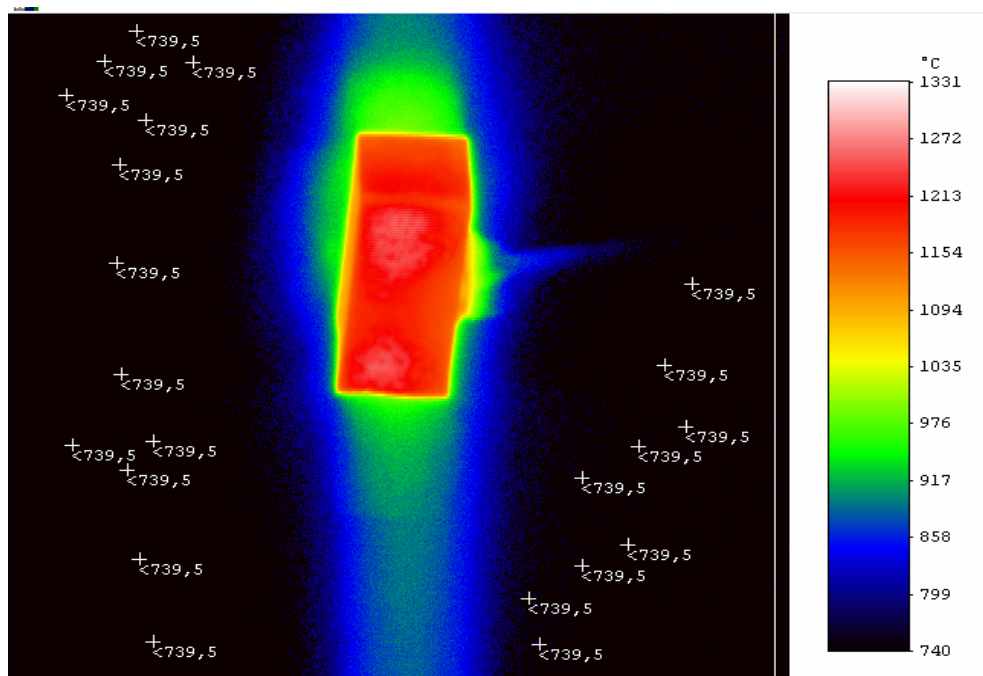


Рис.5 Калибровка термовизора с помощью термопары

При нагреве опытного образца получена кривая зависимости температуры от времени нагрева (рис. 6), необходимая для последующих экспериментов по жидкофазному спеканию образцов.

**Кривая зависимости времени нагрева образцов из сплава ЭП741НП от времени**

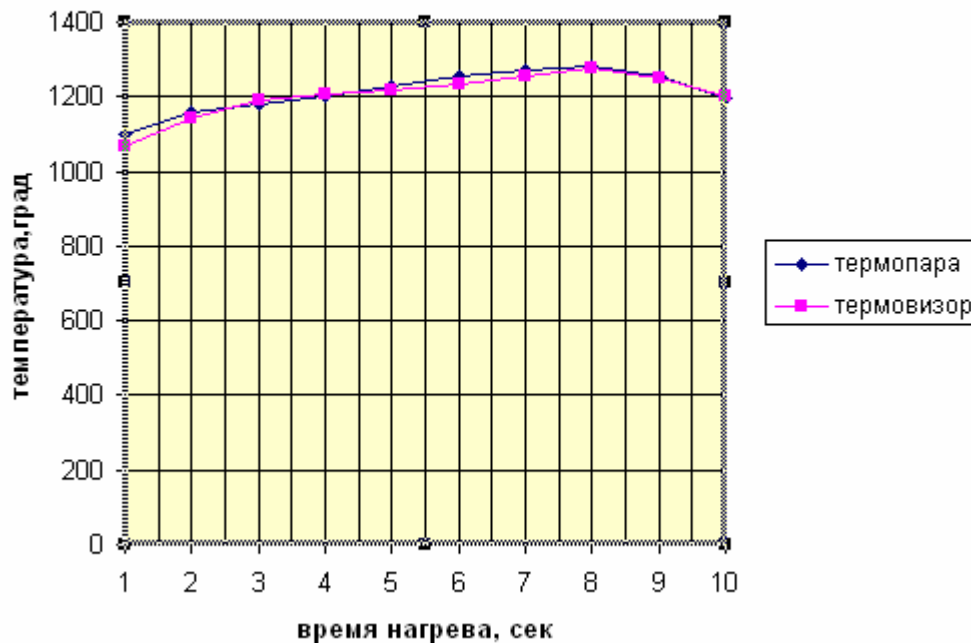


Рис.6 Кривая зависимости времени нагрева образцов из сплава ЭП741НП от времени.

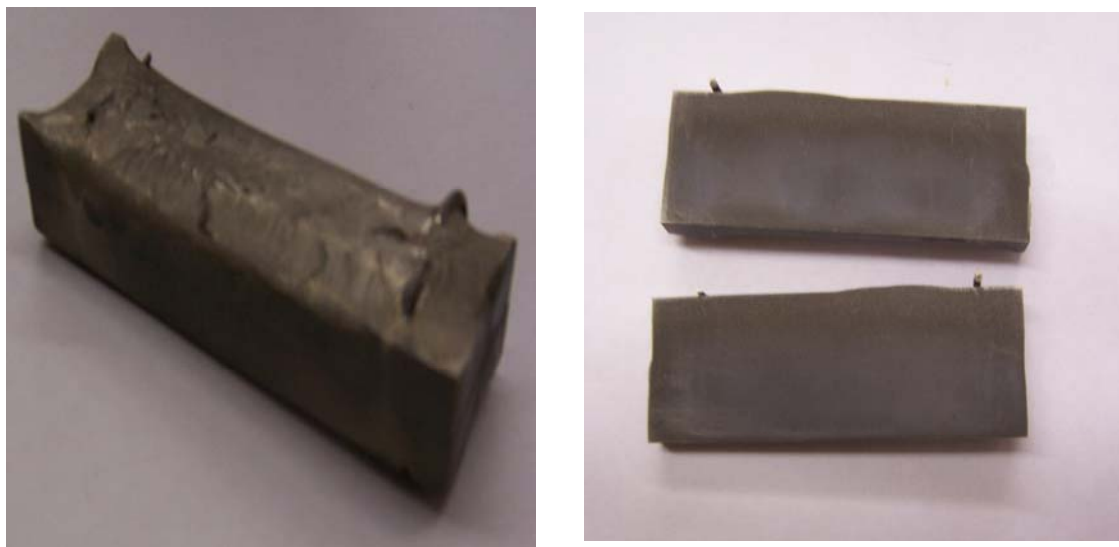


Рис.7 Образец после жидкофазного спекания электронным лучом в вакууме

В настоящее время ведется работа по исследованию макро- и микроструктуры соединения образцов после жидкофазного спекания электронным лучом в вакууме.

### **Выводы**

1. Выполненные исследования по созданию неразъемных соединений из заготовок из сплава ЭП741НП методом жидкофазного спекания на основе исследования механических свойств показали перспективность данного метода.

2. Особое внимание необходимо обратить на разработку и применение устройства для локального нагрева места неразъемного соединения деталей.

3. После жидкофазного спекания свойства образцов улучшаются. Выше временное сопротивление разрыву, улучшаются показатели пластичности.

4. Длительная прочность некоторых образцов без разрушения достигает 899 часов.

5. В исследуемых образцах в зоне соединения деформация при испытаниях на разрыв идет по механизму, который реализуется в высокопластичных сплошных металлах, то есть перед разрушением в них образуются поры

6. Исследования показали, что спекание возможно с применением нагрева в вакууме как в печи, так и электронным лучом.

### **Литература**

1. *Белов А.Ф.* Металлургия гранул. Сб. статей, вып.3 ВИЛС, 1986. –30с
2. *Антонов В.В.* Спекание многокомпонентных систем с образованием жидкой фазы. Доклад. –1989,–с 4-7.

УДК 621.77.07

## **СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШТАМПОВОК ЛОПАТОК ГТД ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ГОРЯЧИМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ С ПОДВИЖНЫМИ МАТРИЦАМИ.**

Скобелева Анна Сергеевна<sup>(1)</sup>, Афонина Анастасия Павловна<sup>(2)</sup>

*Аспирант 2 года<sup>(1)</sup>, студент 4 курса<sup>(2)</sup>*

*Кафедра «Обработка материалов давлением»*

*ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная академия имени П.А.Соловьева»*

*Научный руководитель: М.Л. Первов*

*кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением»*

Лопатка- это деталь компрессора (турбины), предназначенная для изменения параметров воздуха (газа).

Конструктивными основными элементами лопаток являются следующие [2] :

- перо лопатки;
- хвостовик (хвостовики);
- бандажные полки;
- антивибрационные полки.

Производство лопаток основано на различии конструкций самих лопаток.

Лопатки ротора в результате вращения с большой угловой скоростью, то есть с большим числом оборотов, подвергаются весьма существенным нагрузкам от воздействия центробежных сил.

К основным проблемам изготовления заготовок лопаток можно отнести следующие [1]:

- резкое отличие в геометрических размерах и площадях поперечных сечений замковой части и пера лопатки;
- сложная геометрия пера лопатки и тонкое полотно, толщина которого соизмерима с высотой облоя, поковки относятся к длинноосным;
- специфика пластического деформирования штампуемого материала определяется его свойствами.

Заготовка для получения лопаток - прутки цилиндрический, диаметр которого выбирается из условия усреднения площади поперечного сечения замковой и перовой части.

Для набора поперечного сечения замковой части применяется операция горячей высадки на горизонтально-ковочной машине, а для приближения профиля и площади пера лопатки к требуемой, используют операцию и

переходы горячего вальцевания, при этом перовая часть получает некоторое удлинение. Эта операция осуществляется на ковочных вальцах. Обычно заготовки под штамповку получают только высадкой или только горячей вальцовкой. Затем следует штамповка, как правило, в открытых штампах с последующей обрезкой облоя. Альтернативным способом получения промежуточных заготовок является выдавливание.

В качестве финишной операции при изготовлении пера может быть применена холодная вальцовка. После нее не требуется механическая обработка со снятием стружки. Однако этот процесс требует высокоточных штампованных заготовок, и получил широкое применение только для высоколегированных сталей и сплавов. Основное назначение этого процесса - выглаживание поверхности.

Термин "изотермическое деформирование", получивший распространение у нас в стране и за рубежом, отражает условия процесса, а не температуру металла, которая в процессе деформирования будет повышаться вследствие теплового эффекта деформации. Кроме того, в некоторых случаях целесообразно (как будет показано далее) изначально задавать неодинаковые температуры нагрева заготовки и штампа.

Практическое осуществление изотермической штамповки потребовало новых разработок в области деформирующего оборудования, штампов и установок для нагрева штампов, а также теоретических и экспериментальных исследований параметров технологических процессов.

В качестве деформирующего оборудования для изотермической штамповки применяют в большинстве случаев гидравлические прессы.

Целью данной работы является: исследование и разработка способа изготовления штампов лопаток ГТД переменного сечения горячим выдавливанием с подвижными матрицам.

Такой технологический процесс должен содержать следующие основные операции:

1. Изготовление заготовок. Контроль полученной заготовки осуществляется по размерам(5%-10% от партии), на дефекты(10% от партии). В случае обнаружения трещин, заусениц и других дефектов, заготовку считают браком.

2. Нагрев до температуры штамповки.

3. Осадка по образующей. Процесс осадки осуществляется на КГШП в плоских бойках. Осадку проводят для лучшего протекания выдавливания.

4. Нанесение смазочного материала.

5. Изотермическое выдавливание. Процесс изотермического выдавливания осуществляется в специальной установке, описание которой приводится ниже, установленной на гидравлическом прессе.

6. Изотермическая штамповка.

7. Обрезка облоя.

Для осуществления данного технологического процесса и проведения изотермического выдавливания необходима установка для изотермического

выдавливания, которая позволяла получать выдавленные штамповки переменного сечения. Переменное сечение, близкое по форме к готовой лопатке, позволит уменьшить коэффициент использования материала за счет уменьшения припусков по перу и хвостовику.

Был проведен анализ конструкций установок для выдавливания штамповок переменного сечения.

Известен штамп для выдавливания лопаток, содержащий обойму с коническим гнездом, размещенную в нем разъемную матрицу со вставками на полуматрицах, образующих гравюру замковой и перовой частей лопатки (SU1518997A1). Недостатком способа является невозможность получения штамповок переменного сечения (особенно при изготовлении лопаток), а так же данный штамп рентабельно применять только в условиях крупносерийного или массового производства.

Так же известен способ изготовления штамповок на прессах горячим выдавливанием с подачей нагретой заготовки в подвижный контейнер, включающий запрессовку заготовки в контейнере пресс-шайбой, прессование части заготовки в матрицу, входящую в состав матричного узла, с формированием штамповки с частью постоянного сечения и формирования на указанной штамповке утолщения путем осадки оставшейся части заготовки (SU 632423A, 15/11/1978, В 21 С 23/08).

Недостатком данного способа является высокая стоимость и сложность изготовления инструмента, ограничения по формированию утолщений сложной формы.

За прототип выбран способ изготовления штамповок горячим выдавливанием на прессах с подвижным контейнером, включающим подачу нагретой заготовки в контейнер, запрессовку в контейнере пресс – шайбой и прессование части заготовки в матрицу, входящую в состав матричного узла, с осадкой оставшейся части заготовки в плоскости между сопрягаемыми плоскостями матричного узла и контейнера (RU 2259897 С, В21С23/03, В21J5/06).

Недостатком данного способа является изготовление высокоточных деталей постоянного сечения, а также сложность контроля синхронного перемещения пресс – шайбы и контейнера.

Целью предложенного технического решения является возможность получения заготовок переменного сечения, приближающихся к готовому изделию путем выдавливания, что приводит к экономии металла. Указанная цель достигается тем, что в предлагаемом способе изготовления штамповок выдавливанием на прессах полуматрицы выполнены подвижными (рис.1.), перемещение которых обеспечивается перемещением клиньев по их конической поверхности. Управление клиньями осуществляется за счет функциональной связи с ползуном.



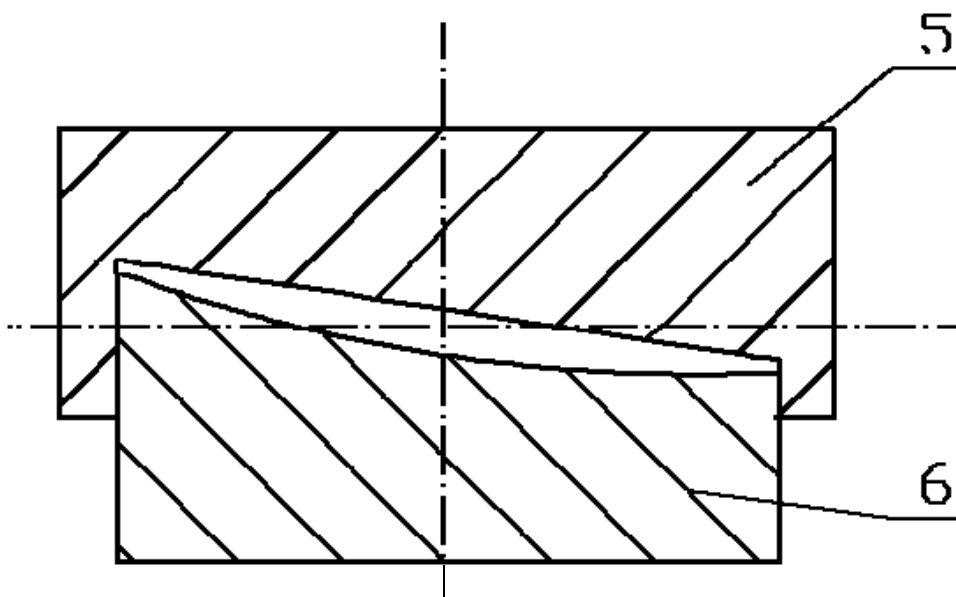


Рис. 1. Подвижные полуматрицы

Установка содержит верхнюю плиту с закрепленным на ней пуансоном, нижнюю плиту, на которой размещаются две полуматрицы. В отверстиях плиты располагаются два клина (рис.2.) с отдельной системой гидравлического привода и выталкиватель. На полуматрицах располагается контейнер для заготовки.

В ходе данного технологического процесса получается штамповка переменного конического сечения и появляется возможность получения штамповок лопаток близких к готовой детали.

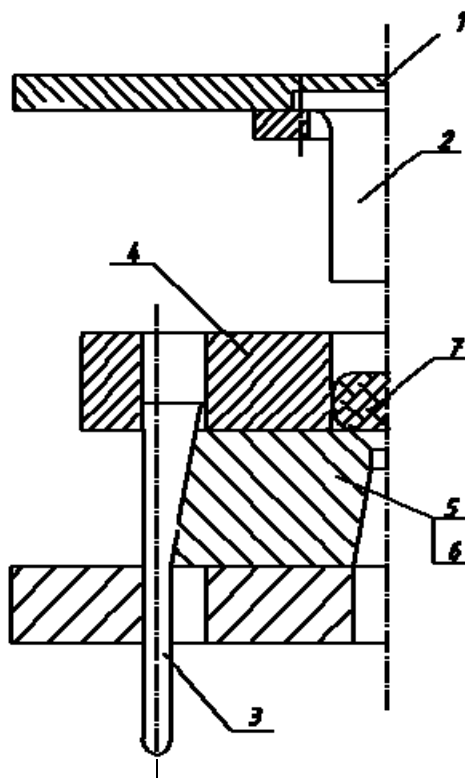


Рис.2. Схема предлагаемой установки для изотермического выдавливания

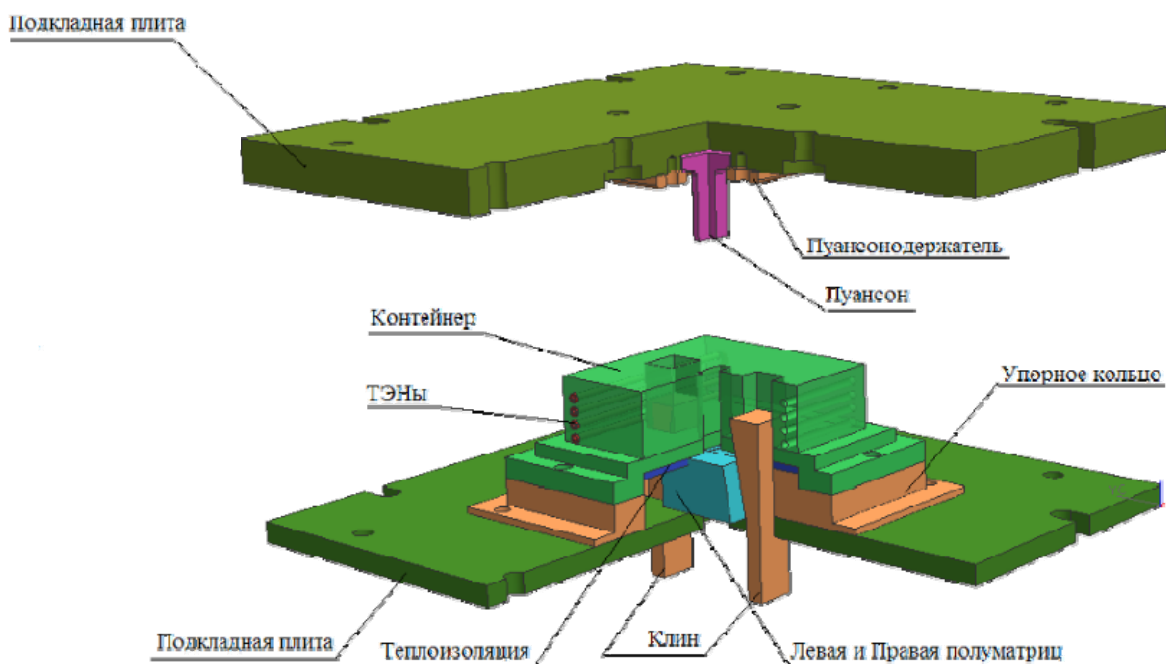


Рис.3. Предлагаемая конструкция установки для выдавливания переменного сечения заготовок лопаток

По данной конструкции установки получен патент №2374027(заявка №2008106487) от 27 ноября 2009 года.

Таким образом, данный способ изготовления штамповок лопаток переменного сечения является приоритетным для дальнейшего развития авиастроения.

### Литература

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т./Ред. Совет: Е.И.Семенов и др. – М.: Машиностроение, 1985 – т.2.Горячая штамповка/ под ред. Семенова, 1985г., 592 с.
2. *Мамаев В.Б.* Технология производства лопаток ГТД. Учебное пособие РГАТА, 2004 г., 58с.
3. *Никольский Л.А.* Горячая штамповка заготовок из титановых сплавов, М., Машиностроение, 1964, 227 с.

УДК 53.084.823

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОДОГИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СБОРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Асеев Александр Сергеевич<sup>(1)</sup>, Берестова Ирина Владимировна<sup>(2)</sup>

*Студент 6 курса<sup>(1)</sup>, студент 6 курса<sup>(2)</sup>,*

*кафедра «Оборудование и технологии обработки давлением»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,*

*Научный руководитель: А.С. Езжеев,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии обработки давлением»*

В настоящее время в строительной индустрии все шире начинает применяться изготовление зданий и сооружений из легких металлических конструкций (панелей), производимых на заводе-изготовителе, с последующей доставкой на строительную площадку для сборки из них несущего каркаса здания. Ведущей фирмой в этом направлении является финская фирма Rosette Systems Ltd, производящая специализированные автоматические линии для изготовления панелей.

Наша промышленность таких специализированных линий не производит, в связи с чем настоящая работа является актуальной.

Конструкция панелей показана на рис. 1. Она состоит из двух типов профилей, продольного (рис.2), в котором выполняются отверстия с отбортовкой, и поперечного (рис.3), в котором выполняются отверстия с диаметром, несколько большим наружного диаметра отбортовки.



Рис 1. Общий вид панели



Рис. 2. Продольный профиль



Рис. 3. Поперечный профиль

При сборке панели (рис.4) поперечный профиль вставляется в продольный так, чтобы отбортовка одного входила в отверстие другого. Путем развальцовки борта образуется неразъемное соединение профилей.



Рис. 4. Соединение профилей

Профили изготавливаются путем последовательной гибки ленты в рабочих клетях профилегбочного стана. На рис. 5 и 6 показано последовательное формоизменение профилей в клетях станов.

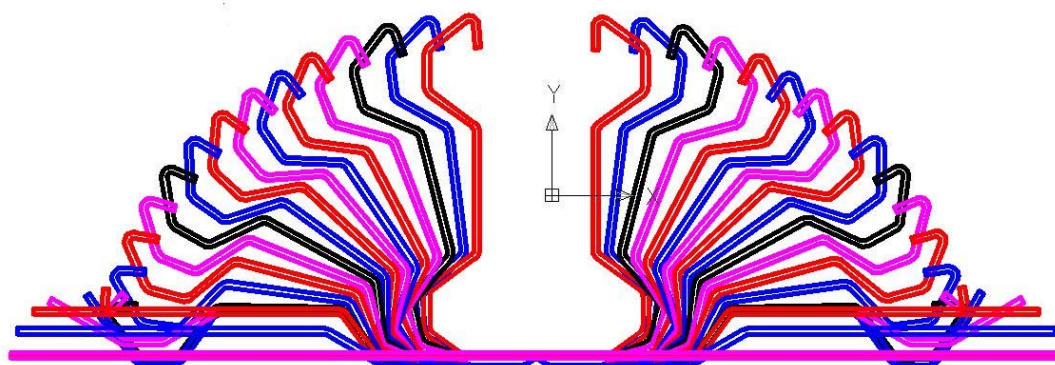


Рис. 5. Переходы гибки при профилировании продольного профиля

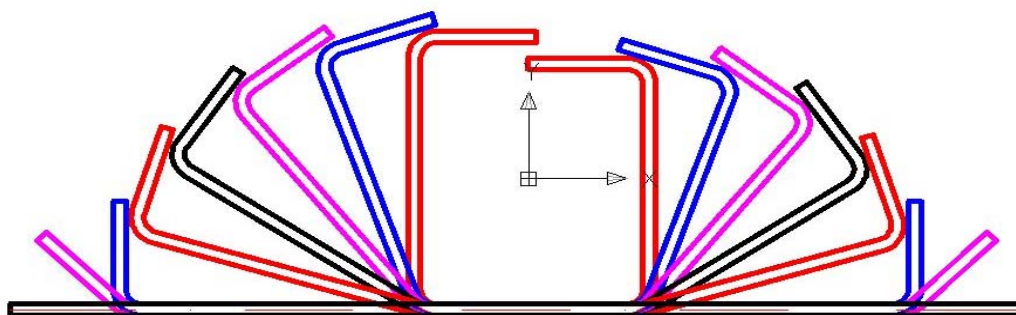


Рис. 6 Переходы гибки при профилировании поперечного профиля

Ширину ленты для изготовления профилей можно определить аналитическим, графоаналитическим и графическим методами. Выбор метода расчета зависит от сложности сечения профиля и необходимой точности расчета.

При определении ширины исходной заготовки аналитическим методом сечение профиля делится на элементарные участки: прямолинейные и места закруглений, как показано на рис.7.

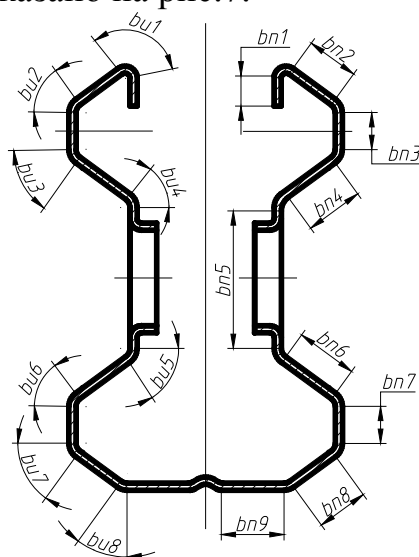


Рис. 5. Разделение профиля на участки

Сумма длин этих участков по средней линии и является шириной исходной заготовки  $B$ :

$$B = \sum b_n + \sum b_u \quad \dots\dots\dots (1)$$

где  $b_n$  - ширина прямолинейного элемента, мм;  
 $b_u$  - ширина места изгиба, мм.

$$b_u = \frac{\pi \cdot \rho \cdot \alpha}{180} \quad \dots\dots\dots(2)$$

где  $\alpha$ - угол, образуемый между участками профиля при его подгибке, град;

$\rho$  - радиус закруглений по нейтральной линии деформации, мм.

Радиусы закруглений нейтральной линии в местах изгиба определяют различными способами. По одному из способов величину этого радиуса находят в зависимости от соотношения между величинами внутреннего радиуса закругления и толщины полосы по формуле

$$\rho = R + K \cdot s \quad \dots\dots\dots(3)$$

где R- внутренний радиус закругления в, мм; s- толщина полосы, мм; K- коэффициент, зависящий от соотношения R/s.

Величину K для расчета радиусов закруглений в зависимости от отношения R/s выбирают по таблице 1

**Таблица 4. Коэффициент K**

<b>R/s</b>	<b>K</b>
0,5	0,37
1	0,41
1,5	0,44
2	0,45
4	0,47

Для заданных размеров профилей расчетом определено, что ширина ленты для продольного профиля равна 274 мм, для поперечного - 120мм при толщине ленты 1,5 мм.

Углом подгибки криволинейного участка сечения профиля считается угол, получающийся при изменении величины этого участка относительно основной оси профиля.

На выбор углов подгибки в основном влияют следующие факторы:

а) величина растягивающих напряжений, возникающих на кромках подгибаемых участков;

б) тип профилировочного стана (его мощность) и инструменты, при помощи которого осуществляется подгибка;

в) требуемая точность формы сечения профиля и номер перехода, на котором происходит подгибка.

Для выяснения влияния растягивающих напряжений, возникающих на кромках подгибаемых участков, рассмотрим случай подгибки полки профиля на угол  $\alpha$  (рис. 8).

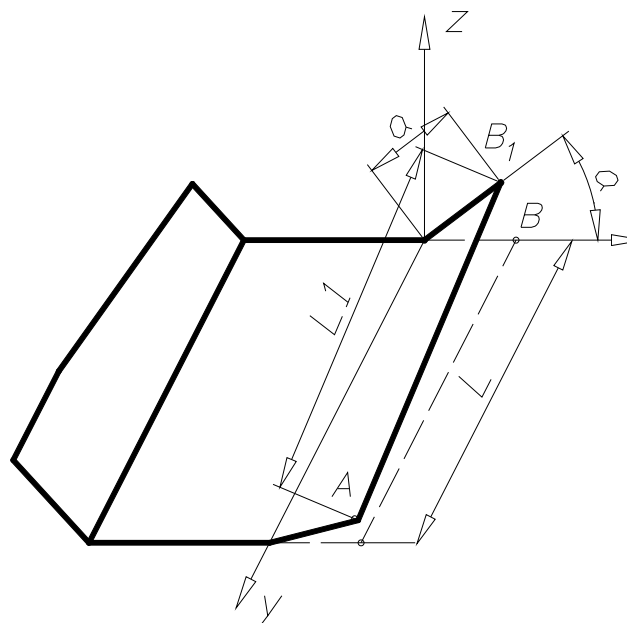


Рис. 8. Общий случай подгибки полки профиля

Здесь полка подгибается на некоторый угол  $\alpha$  из ее первоначального положения, когда она составляла некоторый угол  $\varphi$  с горизонтом. При такой подгибке происходит удлинение кромки  $AB_1$ , так как точка  $B$  кромки, перейдя в положение  $B_1$  не выходит из плоскости, перпендикулярной направлению движения заготовки.

Сделав допущение, что кромка  $AB_1$  будет прямой линией, а ширина полки остается неизменной, определим величину относительного удлинения кромки  $AB$ :

$$\varepsilon = \frac{AB_1 - AB}{AB} = \frac{L_1 - L}{L} \quad \dots(4)$$

где  $L$  - длина участка до профилирования;

$L_1$  - длина участка после профилирования.

Для определения длины  $L_1$  кромки  $AB_1$  воспользуемся уравнением аналитической геометрии:

$$L_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \quad \dots(5)$$

Определив координаты точек  $A$  и  $B$  и подставив их в формулу 5, после :

тригонометрических преобразований получим:

$$L_1 = \sqrt{L^2 + 2a^2(1 - \cos \alpha)} \quad \dots(6)$$

Тогда величина относительного удлинения кромки будет равна:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L^2 + 2a^2(1 - \cos \alpha)} - L}{L} \quad \dots(7)$$

Решая это уравнение относительно угла подгибки, найдем:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L}{2a} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot (2 + \varepsilon)} \quad \dots \dots \dots (8)$$

Если подставить в эту формулу предельную величину деформации для материала ленты  $\varepsilon_{\text{дон.}}$ , то можно определить предельный угол подгибки  $\alpha_{\text{max}}$ , при котором не произойдет разрыва кромки ленты.

$$\alpha_{\text{max}} \leq 2 \arcsin \frac{L}{2a} \sqrt{\varepsilon_{\text{дон.}} \cdot (2 + \varepsilon_{\text{дон.}})} \quad \dots \dots \dots (9)$$

В наших расчетах предельный угол подгибки получился равным  $\alpha_{\text{max}} = 30^\circ$

Подбор углов гибки и выбор параметров стана производился в программном комплексе SOPRA 2002. Принимая, что предельная деформация для материала профиля не должна превышать 30% на каждом из переходов по клетям стана, определялись допустимые углы подгибки и число клетей стана (см. рис.9).

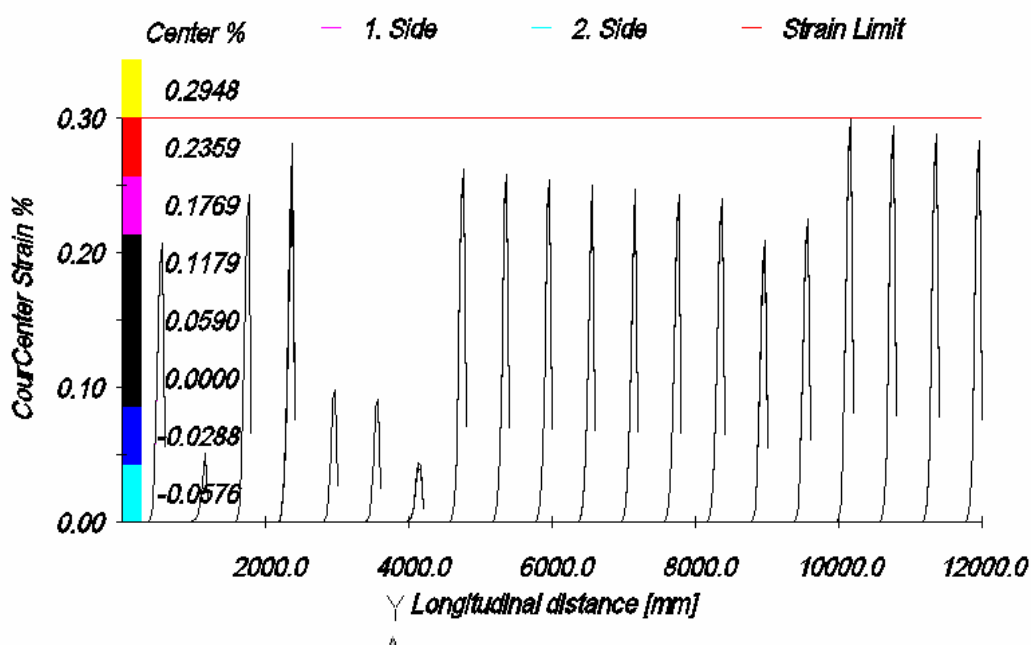


Рис.9. Деформации ленты по клетям стана

В результате моделирования были получены оптимальное количество переходов для каждого профиля и оптимальные параметры станов:

*Параметры стана для продольного профиля:*

- Количество клетей - 21
- Расстояние между клетями – 600мм
- Диаметр валков – 270мм

*Параметры стана для поперечного профиля:*

- Количество клетей - 8
- Расстояние между клетями – 600мм
- Диаметр валков – 270мм



Для операции сборки профилей разработано устройство с цанговым механизмом, которое выполняет неразъемное соединение профилей путем загиба борта. Принцип действия устройства показан на рис.10.

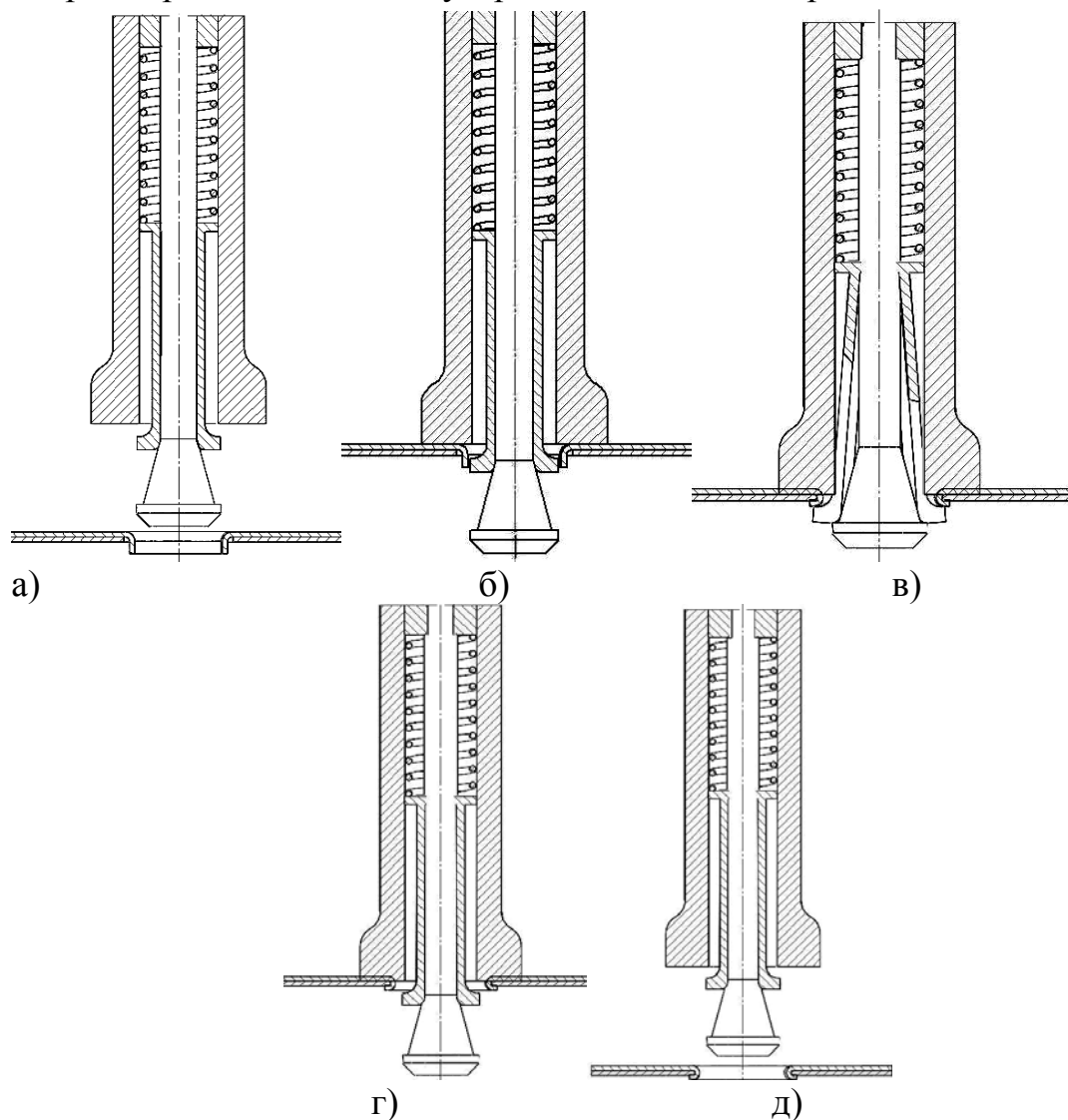
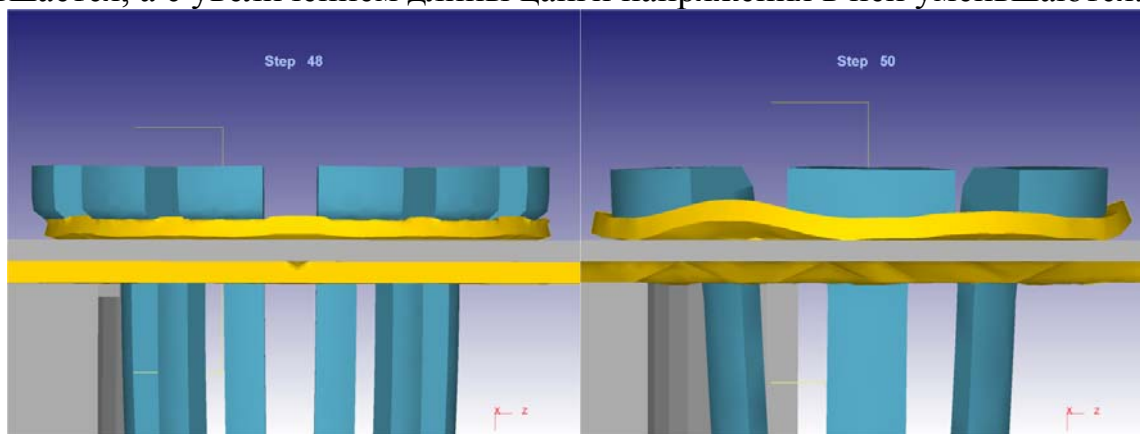


Рис.10. Принцип действия устройства для сборки профилей

Основными элементами устройства являются корпус, подпружиненная цанга и клин (рис.10 а – исходное положение). Устройство вводится в отверстие борта до упора корпуса на плоскость верхнего профиля (рис.10 б), после чего конус вдвигается в цангу, лепестки которой загибают борт вокруг кромки нижнего профиля (рис.10 в). Далее конус выдвигается из цанги, она принимает прежнее положение (рис. 10 г) и устройство выводится из отверстия профилей (рис. 10 д).

Процесс завальцовки борта моделировался в программном комплексе Deform с варьированием длины и количества лепестков цанги. На рис. 11 показано, что процесс соединения профилей происходит, при этом имеет место волнистость на участках между лепестками цанги. По результатам

моделирования установлено, что с увеличением числа лепестков волнистость уменьшается, а с увеличением длины цанги напряжения в ней уменьшаются.



а) цанга с 12 лепестками

б) цанга с 6 лепестками

Рис. 11 Конечная стадия завальцовки борта цангой

На основании разработанной технологии и моделирования процессов разработаны профилегибочные станы для изготовления продольного и поперечного профилей, «летучие» штампы для пробивки отверстий и отбортовки в движущейся ленте, «летучие» ножницы для отрезки профиля, устройство для сборки профилей завальцовкой.

На рис. 12 показан общий вид стана для продольного профиля и пример одной из клеток стана с боковыми роликами

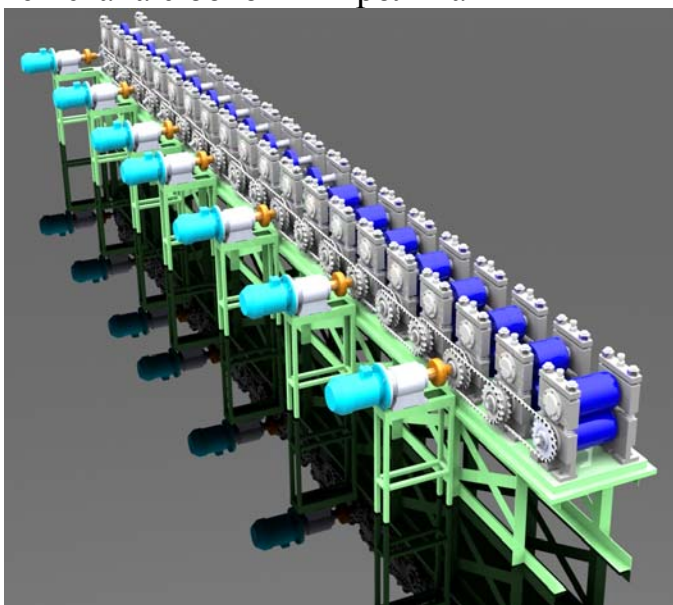


Рис.12 Общий вид стана для изготовления продольного профиля

Техническая характеристика стана:

- Размеры исходной заготовки, мм  
ширина -274  
Толщина -1,5

- Обработываемый материал:  
лист стальной 08кп  $\sigma = 400$  МПа
- Скорость профилирования, мм/с – 100
- Основной диаметр профилирующих роликов, мм  
Верхний – 270  
Нижний -270
- Посадочный диаметр шпинделя, мм – 80
- Посадочная ширина шпинделя, мм – 400
- Главный привод мотор-редуктор  
мощность, кВт – 15,0  
частота вращения, мин – 1440
- Размеры исходной заготовки, мм  
ширина -120  
Толщина -1,5
- Обработываемый материал:  
лист стальной 08кп  $\sigma = 400$  МПа
- Скорость профилирования, мм/с – 100
- Основной диаметр профилирующих роликов, мм  
Верхний – 270  
Нижний -270
- Посадочный диаметр шпинделя, мм – 80
- Посадочная ширина шпинделя, мм – 400
- Главный привод мотор-редуктор  
мощность, кВт – 15,0  
частота вращения, мин - 1440

Для осуществления штамповки в движущейся ленте были рассмотрены несколько вариантов привода «летучих» штампов:

- привод от тянущего вала стана, связанного через управляемую муфту включения с барабаном, трос от которого соединен со штампом, причем диаметры тянущего вала и барабана равны.

-независимый привод штампа от регулируемого электродвигателя через винтовой механизм, гайка которого связана со штампом, причем частота вращения двигателя управляется по частоте вращения вала стана.

- независимый привод штампа от линейного электродвигателя, управляемого по частоте вращения вала стана.

- привод штампа от движущейся ленты путем зажима ленты клещевым захватом, закрепленным в штампе.

На рис. 13 показан «летучий» пресс-штамп с приводом от регулируемого электродвигателя. Штамповка производится от закрепленных в нижней плите штампа гидроцилиндров, штоки которых связаны с верхней плитой. Штамп перемещается на катках по рельсам, установленным на основании.

Электродвигатель и винт закреплены на раме, гайка связана с нижней плитой штампа. После завершения штамповки возврат штампа осуществляется путем реверсирования электродвигателя.

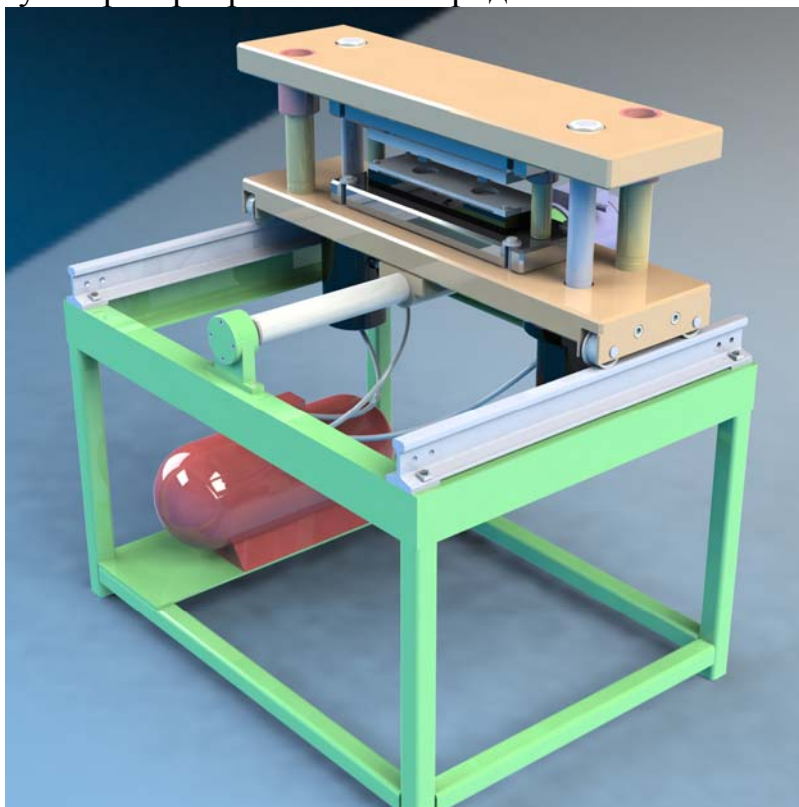


Рис. 13. «Летучий» штамп с приводом от регулируемого электродвигателя

На рис. 14 показаны «летучие» ножницы для отрезки продольного профиля.

Ножницы выполнены в виде подвижной каретки, перемещающейся по рельсам вдоль движения профиля. На каретке установлен отрезной штамп и гидроцилиндр привода ножа штампа. Подвижные части штампа связаны также с клещевыми захватами ленты. При подаче сигнала на отрезку с некоторым опережением клещи захватывают ленту, и в процессе движения каретки нож отрезает профиль. После завершения операции возврат каретки осуществляется с помощью пружины (или противовеса).

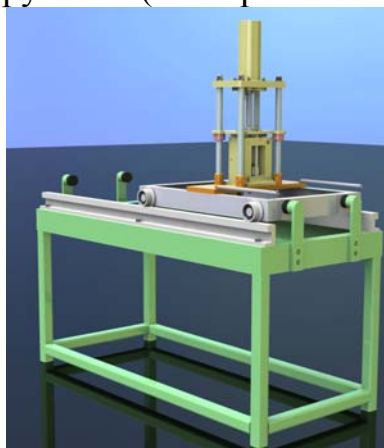


Рис. 14. «Летучие» ножницы для отрезки продольного профиля

На рис. 15 показаны «летучие» ножницы для отрезки поперечного профиля. В отличие от рассмотренных выше ножниц, в которых ввиду сложности конфигурации профиля использовалась отрезка в штампе, для простого по конфигурации поперечного профиля можно использовать отрезку диском. На каретке ножниц установлена отрезная головка в виде отрезного диска с приводом от электродвигателя и гидроцилиндры вертикального перемещения отрезной головки. Отрезная головка связана с клещевыми захватами ленты. Принцип работы ножниц аналогичен рассмотренному ранее. При подаче сигнала включаются гидроцилиндры, отрезная головка опускается, захваты с опережением зажимают ленту и в процессе движения каретки при дальнейшем опускании головки происходит отрезка профиля. Возврат каретки после отрезки осуществляется противовесом.

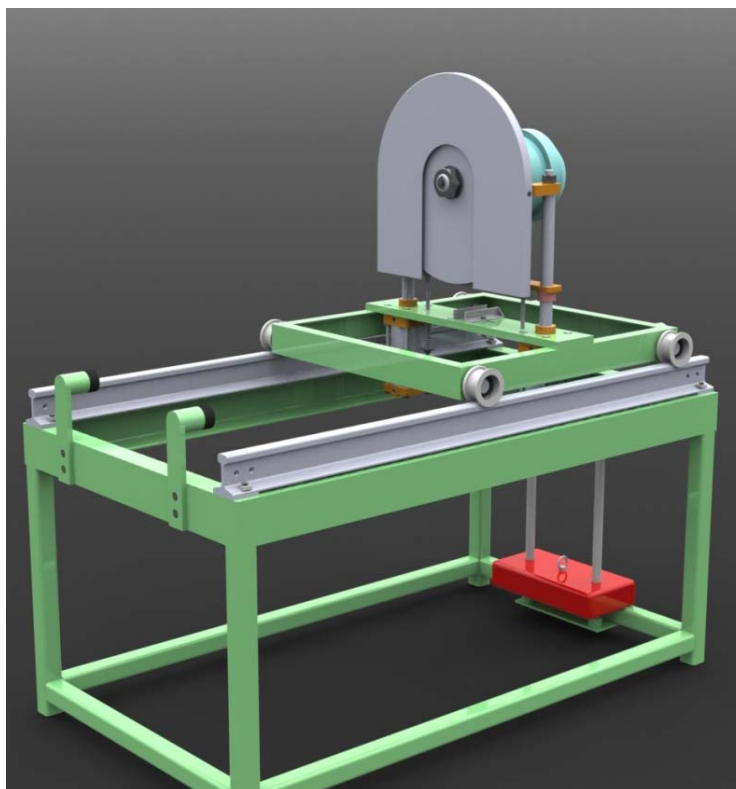


Рис. 15. «Летучие» ножницы для отрезки поперечного профиля

На рис. 16 показано устройство для сборки профилей. Устройство выполнено в виде ручного приспособления, в корпусе которого в нижней части расположен цанговый механизм, а в верхней части мембранный гидроцилиндр привода цанги.

От устройства выходит гибкий трубопровод подачи рабочей жидкости в цилиндр и электропровод в цепь управления приводом (не показаны). Включение привода цанги производится клавишной кнопкой, расположенной на корпусе устройства.



Рис. 16. Устройство для сборки профилей

На стол к оператору поступает комплект профилей для сборки панели. Оператор вручную устанавливает собираемые профили в нужное положение и производит их соединение, для чего вставляет цангу в отверстие профилей и включает привод цанги.

### **Заключение**

В результате выполненной работы определены оптимальные технологические параметры процессов изготовления и сборки профилей, входящих в конструкцию строительных панелей. Используя эти технологические параметры в качестве исходных данных, разработаны конструкции основных агрегатов и узлов автоматизированной линии для производства строительных панелей – профилегибочных станов, штампов, ножниц, устройства для неразъемного соединения профилей в панель. С целью повышения производительности станов выполнение штамповочных операций предусмотрено в процессе движения ленты, т.е. без остановки стана.

## Литература

1. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке.-6-е изд., перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.- 520 с.
2. *Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.* Технология и автоматизация листовой штамповки: Учебник для вузов.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003, 480 с.
3. *А.Д. Матвеева* Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка/ Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др.- М.: Машиностроение, 1985-1987.- 544 с.
4. *Дунаев П.Ф.* Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. пособие для студ. техн. спец. вузов / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов.-8-е изд., перераб. и доп.- М.: Издательский центр
5. *А.Н.Банкетов, Ю.А.Бочаров, Н.С.Добринский и др.* Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для машиностроительных вузов под ред. А.Н.Банкетова, Е.Н.Ланского.-2-е изд., перераб. и доп.- М.:Машиностроение, 1982.-576 с., ил.
6. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т.- 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н.Жестковой.- М.: Машиностроение , 2001.- 920 с.: ил.

УДК 621.7.043

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОКОВОК С ФЛАНЦЕМ

Бильчук Мария Викторовна

*Студентка 6 курса, магистр 2го года обучения,  
Кафедра «Системы пластического деформирования»  
ГОУ ВПО Московский Государственный Технологический Университет  
«СТАНКИН»*

*Научный руководитель: Е.Н. Сосенушкин,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Системы пластического  
деформирования»*

### Актуальность работы

В отечественной промышленности распространены детали типа фланцев. Такие детали широко применяются в различных отраслях промышленности, в частности - в арматуростроении. Отрасль арматуростроения на сегодняшний день вполне продвинута и конкурентноспособна. Однако актуален вопрос повышения эффективности производства и снижения себестоимости изделий арматуростроения.

Номенклатура деталей типа фланцев весьма обширна. Существует ряд технологий штамповки этого вида поковок. Традиционным методом их изготовления является облойная штамповка (штамповка в открытых штампах). Главными преимуществами этого метода являются высокая производительность и возможность получения относительно точных поковок простой формы. Однако у рассмотренного метода есть ряд недостатков:

- увеличенный расход металла, из-за наличия облоя и больших припусков и напусков (низкий коэффициент использования металла). Облой является технологической необходимостью, т.к. он обеспечивает заполнение полости штампа, но потери металла при штамповке могут достигать 25% и более. Наличие облоя увеличивает силу деформирования и требует дополнительного оборудования для проведения операции обрезки;

- потребность в сравнительно больших технологических силах, из-за воздействия инструмента на всю площадь поковки с облоем (завышенные мощности нагревательного и штамповочного оборудования);

- производство деталей сложной формы (типа крестовин зубчатых колес, сплошных и полых ступиц с периферийными элементами в виде ребер, отростков, выступов и др.) средствами облойной штамповки становится особенно затратным из-за высокой трудоемкости последующей механической обработки.



Повысить эффективность изготовления деталей типа фланцев и устранить вышеуказанные недостатки позволяет технология безоблойной штамповки, основанная на методе комбинированного выдавливания в разъемных матрицах. Предложенная технология позволяет повысить коэффициент использования металла с 0,25-0,70 до 0,5-0,85, или на 20-100%, т.е. перевод на штамповку в разъемных матрицах одной тонны деталей дает экономию металла от 0,25 до 2 т.

При переходе на штамповку в разъемных матрицах производительность труда в среднем увеличивается на 25% за счет сокращения числа переходов штамповки с двух-четырех до одного-двух. Процесс безоблойной штамповки, в отличие от облойной, может быть легко автоматизирован, так как выполняется за минимальное число переходов и обеспечивает хорошую фиксацию (центрирование) заготовок в ручье. При штамповке в разъемных матрицах создаются условия для получения детали с плотной структурой. Расположение волокон в теле детали, в силу близости форм поковки и готовой детали, благоприятное. Важным преимуществом процесса является возможность предотвращения пористости деталей (за счет исключения выхода внутренних, загрязненных примесями, слоев заготовки на поверхность детали).

Однако, несмотря на большую эффективность, способ безоблойной штамповки долгое время не мог быть внедрен в широкое промышленное применение. Это объяснялось недостаточным техническим уровнем штамповочного производства, отсутствием специализированного оборудования, отсутствием как эмпирических, так и теоретически обоснованных формул для расчета температурных и силовых режимов безоблойной штамповки по переходам и т.п.

Деталью – представителем, имеющим фланец, для которой разрабатывается технологический процесс в настоящей работе, является золотник.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является повышение эффективности технологии штамповки фланцевых поковок за счет снижения материальных затрат, уменьшения энергетических затрат и увеличение производительности технологического процесса штамповки деталей типа фланцев. Для достижения указанной цели в работе ставились следующие задачи:

- оценить современное состояние исследований по штамповке поковок деталей типа фланцев на основе анализа промышленных и литературных данных;
- разработать ресурсосберегающую технологию штамповки деталей типа фланцев с развитой втулочной частью, осуществляемую на универсальных прессах с применением специального штампа с устройством противодавления;

- проанализировать разработанную технологию по критериям экономической эффективности;
- разработать расчетные зависимости для оценки силовых параметров технологического процесса.

**Научная новизна** работы заключается:

- в разработанных технологических процессах, повышающих эффективность производства деталей, имеющих фланец за счет увеличения коэффициента использования металла, снижения энергозатрат, в связи с уменьшением технологических сил, увеличения производительности, связанное с уменьшением числа переходов штамповки и снижения затрат на изготовление штамповой оснастки, уменьшением трудоемкости последующей металлообработки;
- в математических моделях энергетического метода, позволяющих получить аналитические зависимости для определения технологических сил;
- в выявлении закономерностей течения металла при сложном комбинированном выдавливании с разделением очагов деформации, позволяющих прогнозировать возникновение дефектов в виде зажимов и недоштамповки;
- в установлении адекватности математических и компьютерных моделей на основе проведенных экспериментальных исследований, что подтверждает корректность постановки задач исследования и достоверность полученных результатов.

**Практическая ценность** работы заключается:

- в рекомендациях по конструированию специального устройства противодавления, встраиваемого в штамп с разъемными матрицами, позволяющего универсальным прессам работать в режиме прессов двойного действия;
- в рекомендациях по конструированию специального штампа с разъемными матрицами, позволяющего изготавливать поковки близких типоразмеров, схожей номенклатуры.

Схема предлагаемой технологии представлена на рис.1.

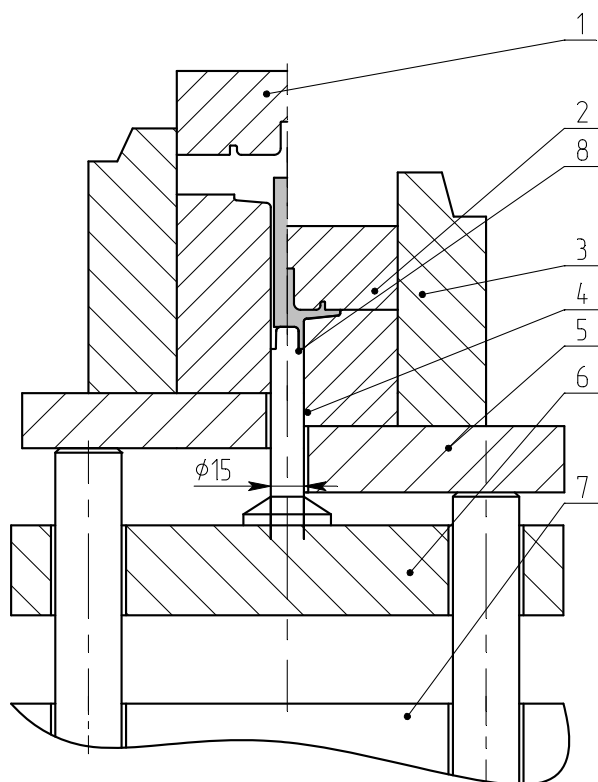


Рис. 1. Схема экспериментального штампа  
 1 – верхняя полуматрица; 2 – нижняя полуматрица; 3 – бандаж;  
 4 – пуансон; 5 – плита; 6 – стол прессы; 7 – нижний привод; 8 – заготовка.

При движении верхней полуматрицы *1* до смыкания с нижней *2* происходит формообразование фланцевой части (поперечное выдавливание). После плотного смыкания полуматриц начинается их дальнейшее движение как единого инструмента. В результате этого движения окончательно формируется втулочная часть с осевым отверстием в торце и фланцевая часть поковки (поперечное и обратное выдавливание).

Для определения технологических сил, необходимых для штамповки поковки золотника был применен энергетический метод верхней оценки [2]. Приняты следующие допущения: деформируемый материал является жесткопластичным, однородным, неупрочняемым и несжимаемым. Наибольшие силы деформирования и раскрытия инструмента возникают на заключительной стадии процесса при вытеснении избытка металла в компенсационную полость. Поэтому наиболее интересна и рассматривается именно эта стадия процесса. Модель жесткопластичного тела упрощает решение большинства задач обработки металлов давлением. Она предполагает [3,4] несжимаемость материала; его мгновенный переход из абсолютно недеформированного (жесткого) состояния в пластическое, когда нагрузки превышают предельную величину, и подобный обратный переход; отсутствие упругих деформаций [2].

Пластическая деформация развивается в очагах высотой *H*, заключенных в объеме между плоскостью торца пуансона и гравюрой верхней полуматрицы, а также в объеме между плоскостью нижней и верхней

полуматрицами. Между очагами деформации в полости верхней полуматрицы  $L$  и в полости нижней полуматрицы под очагом располагаются жесткие зоны, неподверженные пластической деформации.

Очаг деформации состоит из двух плоскоцилиндрических областей  $1, 2$ , в каждой из которых осевая  $v_z$  и радиальная  $v_r$  скорости течения зависят соответственно лишь от осевой и радиальной координат, а сдвиги локализованы на границах этих областей, области  $3, 4$  и  $5$  являются жесткими.

Плоскости нижней полуматрицы сообщена малая виртуальная скорость  $v_i$ , направленная в сторону верхней полуматрицы.

Используя граничные условия и частное решение условия несжимаемости [2]:

$$\begin{aligned} v_z &= c_1 z + c_2; \\ v_r &= -0,5c_1 r + c_3/r, \quad v_\varphi = 0; \end{aligned}$$

где  $c_1, c_2$  и  $c_3$  – произвольные постоянные, и условие непрерывности нормальных составляющих скоростей на поверхностях разрыва скоростей, получим кинематически возможные поля скоростей для областей  $1$  и  $2$ .

Используемый метод расчета основан на условии, что процесс деформации должен осуществляться при минимально возможных энергетических затратах. Поэтому активные и реактивные силы  $P$  и  $P_i$  могут быть получены после группировки рассчитанных членов равенств мощностей всех внутренних и внешних сил (1), (2), действующих на деформируемый металл, содержавших скорость пуансона  $v$  и виртуальную скорость  $v_i$ , и обращения в нуль соответствующих множителей при них.

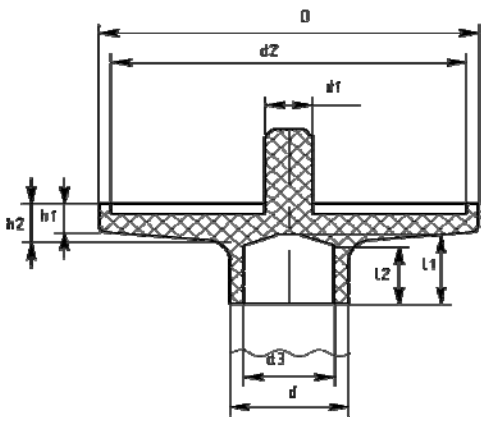
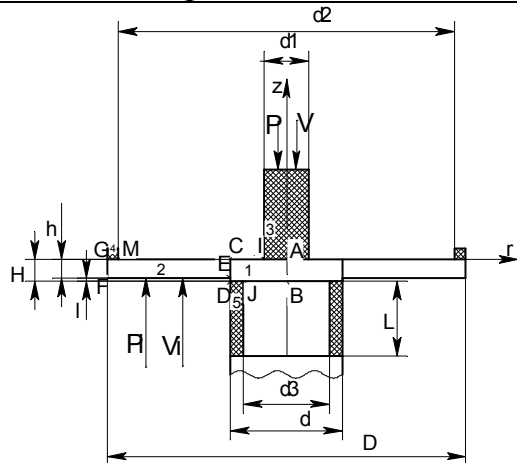
$$P = f(\sigma_s, d, D, H, d_n, \mu); \quad (1)$$

$$P_i = f(\sigma_s, d, D, H, L, d_n, \mu); \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала;  $D$  – диаметр фланца поковок;  $H$  – высота фланцевой части поковок;  $L, d_n$  – геометрические параметры поковок;  $\mu$  – коэффициент трения (табл. 1).

Для оценки величины активной и реактивной силы были построены линейные зависимости по выражениям (1) и (2). В табл. 2 приведены линейные зависимости для оценки сил при деформировании поковки вентильная головка. В результате расчетов, учитывая, что сопротивление деформированию латуни ЛС59-1 при  $800^\circ\text{C}$  составляет  $\sigma_s = 60 \text{ МПа}$ , значения сил будут равны: активная  $-500 \text{ кН}$ ; реактивная  $-430 \text{ кН}$ .

**Таблица 1. Силовые параметры**

Модель	
параметрическая	расчетная
	
Сила	
технологическая	противодавления
$P = \frac{\sigma_s d^2 \pi}{4} + 2\pi\sigma_s + \frac{D^2}{8} \ln \frac{D}{d}$ $- \frac{2\sigma_s d \pi}{\sqrt{3}} + \frac{\sigma_s (d - d_3) \pi}{2H\sqrt{3}} + \frac{\sigma_s \pi D^2 (d - d_3)}{8H\sqrt{3}} -$ $\frac{\sigma_s \pi l^2 (d - d_3)}{4H\sqrt{3}} + \frac{\sigma_s \pi l_1}{2\sqrt{3}H} - \frac{\sigma_s \pi D^2 d_1}{8\sqrt{3}H} -$ $\frac{\sigma_s \pi l^2 d_1}{4\sqrt{3}H} - \frac{\sigma_s \pi (D^3 - d_2^3)}{8\sqrt{3}H} +$ $\frac{\sigma_s \pi D^2 (D - d_2)}{8\sqrt{3}H} + \frac{\mu \sigma_s \pi D^2 (d - d_1)}{8H} -$ $\frac{\mu \sigma_s \pi l^2 (d - d_1)}{4H} - \frac{\mu \sigma_s \pi l^2 d}{2H} + \frac{\mu \sigma_s \pi D H}{2}$ $- \frac{\mu \sigma_s \pi (d_2^3 - d^3)}{8H} + \frac{\mu \sigma_s \pi D^2 (d_2 - d)}{8H} -$ $\frac{\mu \sigma_s \pi (D^3 - d^3)}{8H} + \frac{\mu \sigma_s \pi D^2 (D - d)}{8H} + \frac{\mu \pi \alpha_3^2}{4H} -$ $\frac{\mu \pi \alpha_3^2 d_3}{4H} + \frac{\mu \pi \alpha_3^2 D^2 d_3}{8H}$	$P_i = -2\pi\sigma_s - \frac{D^2}{8} \ln \frac{D}{d} + \frac{\sigma_s d \pi}{2\sqrt{3}} -$ $\frac{\sigma_s \pi D^2 d_1}{8\sqrt{3}H} + \frac{\sigma_s \pi l^2 d_1}{8\sqrt{3}H}$ $+ \frac{\sigma_s \pi (D^3 - d_2^3)}{8\sqrt{3}H} - \frac{\sigma_s \pi (D^3 - D d_2)}{8\sqrt{3}H}$ $- \frac{\mu \sigma_s \pi D (d - d_1)}{8H} + \frac{\mu \sigma_s \pi l^2 (d - d_1)}{8H} -$ $\frac{\mu \sigma_s \pi D H}{2} + \frac{\mu \sigma_s \pi (d_2^3 - d^3)}{8H} -$ $\frac{\mu \sigma_s \pi (D^3 - d^3)}{8H}$ $\frac{\mu \sigma_s \pi D^2 (d_2 - d)}{8H} + \frac{\mu \sigma_s \pi D^2 (D - d)}{8H} -$ $\frac{\mu \sigma_s \pi D^2 (D - d)}{8H} + \frac{\mu \sigma_s \pi l^2 d_3}{8H}$ $- \frac{\mu \pi \sigma_s D^2 d_3}{8H}$

Рассмотренная математическая модель процесса течения металла позволяет определить силовые параметры, необходимые для дальнейшего поверочного расчета при проектировании штампового инструмента, а так же существенно сократить время на разработку технологии и уменьшить возможность ошибки при расчете.

Таблица 2. Лinéйные зависимости

Графики зависимостей	
сил от напряжения текучести	технологической силы от коэффициента трения
<p>1 – технологическая (активная) сила, кН; 2 – сила противодействия (реактивная), кН.</p>	<p>1 – при <math>\mu=0,15</math>; 2 – при <math>\mu=0,20</math>; 3 – при <math>\mu=0,30</math>.</p>

Современные CAD/CAM/CAE-системы предоставляют пользователю широкий набор средств для моделирования, инженерного анализа, черчения и разработки технологий механической обработки [5]. Одной из таких систем является программа QForm, которая основана на методе конечных элементов (ядро системы). Конечно-элементные алгоритмы специальным образом адаптированы для расчета процессов формоизменения. Сам конечно-элементный расчет скрыт от пользователя. QForm обеспечивает автоматическое формирование расчетных моделей (разбиение на конечные элементы), что позволяет обеспечить высокую точность расчета, не зависящую от квалификации пользователей, а так же позволяет проанализировать всю технологическую цепочку получения поковки, включая нагрев, охлаждение и пластическое деформирование на всех переходах, а также изменение свойств поковки. База данных материалов содержит более 450 марок сталей, десятки сплавов цветных и тугоплавких металлов, что обеспечивает потребности подавляющего большинства пользователей [6].

Задача компьютерного моделирования заключалась в определении геометрии рабочих поверхностей штампа и качества заполнения металлом полостей штампа (рис. 2).

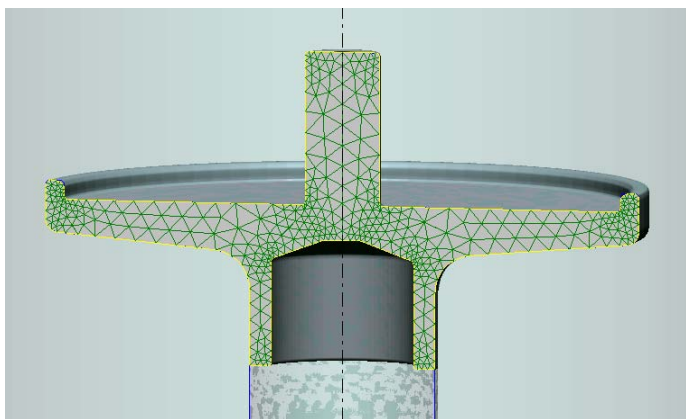


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования

Исходные данные при моделировании:

- материал – m1 (так как в базе данных Q-Form нет латуни, для моделирования использован наиболее близкий материал - медь);
- температура нагрева заготовки до  $850^{\circ}\text{C}$ ;
- температура предварительного нагрева инструмента  $300^{\circ}\text{C}$ .

Для определения формы поверхности разъема матриц так же проводим компьютерное моделирование кинематики течения металла при рабочем ходе до смыкания верхней и нижней полуматриц. Моделирование показало, что до смыкания полуматриц металл во время деформации не попадает в плоскость разъема полуматриц, следовательно, ее форму оставляем без изменений.

В результате проведения компьютерного моделирования удалось

- выявить закономерности течения металла при комбинировании операций обработки давлением с определением возможной потери устойчивости в виде зажимов и недоштамповки;
- определить напряженно – деформированное состояние заготовки и ее температурные поля;
- спроектировать штамп с исправленной геометрией поверхностей полуматриц для бездефектной штамповки;
- существенно сократить время разработки новой технологии штамповки.

На основе проведенных исследований и расчетов был спроектирован штамп для штамповки рассмотренной поковки. Отличительной особенностью конструкции штампа является его универсальность, т.е. он может быть использован для штамповки однотипных поковок, имеющих схожую форму и размеры, в пределах габаритов рассмотренных поковок, при этом его конструкция не изменяется, а замене подлежат только полуматрицы.

В результате предпроектных исследований была установлена целесообразность использования тарельчатых пружин в качестве механического устройства противодействия, исходя из соответствия предъявляемых требований технологического процесса и минимальных капиталовложений для конструирования и изготовления штампа. В штампе

установлен пакет из 6 тарельчатых пружин класса I типа 2 по ГОСТ3057-90 для обеспечения заданного хода нижней полуматрицы, составляющего 30 мм. Была выбрана последовательная схема сборки пакета пружин, так как при циклическом нагружении влияние контактной и фрикционной коррозии при параллельной сборке снижают циклическую выносливость пружин. В предложенном штампе пружины установлены с предварительной деформацией 2,5 мм, для обеспечения которой применяем прижимную плиту и болты, фиксирующие определенную высоту пакета. Параметры спроектированного штампа:

- закрытая высота штампа – 450 мм;
- ход пуансона – 150 мм;
- ход нижней полуматрицы – 30 мм.

Результаты моделирования проверены в лабораторных условиях экспериментально. В рамках исследовательских работ, проводимых в лаборатории кафедры СПД, на прессе К0032 номинальной силой 1600 кН с использованием экспериментального штампа (рис. 1) были отштампованы поковки золотника из 7-и различных материалов (табл. 3). Полученные в результате экспериментов данные занесены в табл. 4, где:  $H$ - величина хода ползуна прессы во время выдавливания,  $P$  - сила выдавливания,  $\sigma_x$  –среднее квадратичное отклонение,  $D$  - дисперсия. Заготовка имеет диаметр:  $\varnothing 28$  мм, Высота заготовки:  $H=85\pm 0,1$  мм, коэффициент трения  $\mu=0,3$ .

**Таблица 3. Материалы поковок в проведенных экспериментах**

	<i>Материал</i>	$\sigma_b$ , МПа	$t_{нагр}$ , °С
1	ЛС59-1	650	950
2	Алюминиевый сплав, АД31	200	400
3	Алюминиевый сплав, Д16	520	400
4	Алюминиевый сплав, В95	580	500
5	Сталь 20	420	1200
6	Сталь 45	640	1200
7	ШХ15	730	1200

**Таблица 4. Результаты проведенных экспериментов**

№	$H$ , мм	$P_1$ , кН	$P_2$ , кН	$P_3$ , кН	$P_4$ , кН	$P_5$ , кН	$P_6$ , кН	$P_7$ , кН	$P_{sr}$ , кН	$D$	$\sigma_x$
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,000	0,000
2	5	8	5	18	10	95	15	10	23,00	880,000	29,665
3	15	40	37	98	75	50	65	55	60,00	392,571	19,813
4	25	67	38	99	70	90	100	100	80,57	470,245	21,685
5	35	80	42	108	78	110	135	130	97,57	927,959	30,462
6	45	120	66	160	118	170	210	195	148,43	2155,388	46,426
7	50	125	70	167	119	180	220	200	154,43	2348,245	48,459



По полученным экспериментальным данным с использованием программы *Excel* автоматически был построен график зависимости среднего значения силы выдавливания от величины хода ползуна прессы во время выдавливания (рис.3). На графике проведена аппроксимирующая кривая, описывающая уравнение регрессии (3). На основании величины адекватности аппроксимации кривой можно сделать вывод об удовлетворительной сходимости теоретических и экспериментальных данных.

$$y = 0,5385 + 2,7389x + 0,4517x^2 - 0,0366x^3 + 0,001x^4 - 8 \cdot 10^{-6}x^5; \quad (3)$$

$R^2 = 0,9987$  - величина адекватности аппроксимации.

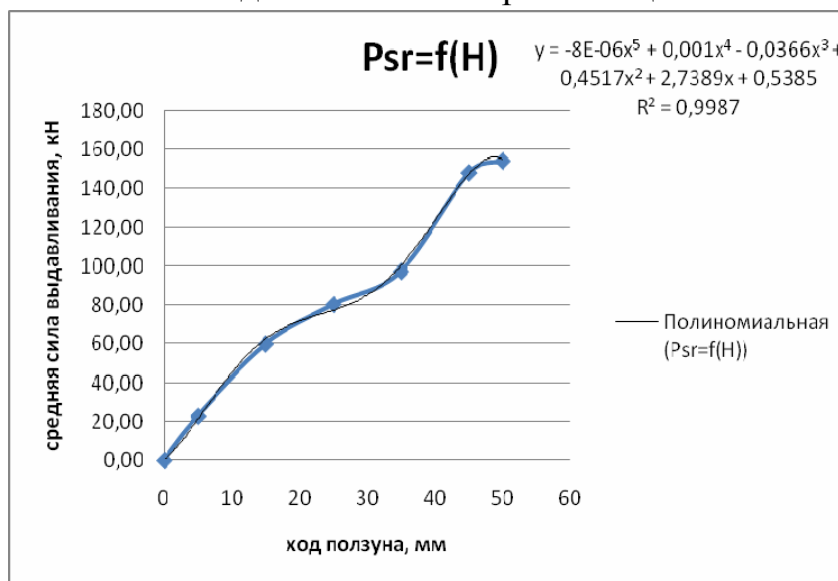


Рис. 3. График зависимости среднего значения силы выдавливания от величины хода ползуна прессы во время выдавливания

В результате проведенного эксперимента получена удовлетворительная сходимость результатов моделирования с экспериментом в плане качества заполнения сложной полости штампа без образования дефектов, а так же рассчитанных технологических сил в процессе разработки технологического процесса и полученных в проведенном эксперименте.

### Выводы

1. На основе анализа характеристик, полученных при проектировании технологического процесса, разработана конструкция специального устройства противодействия, встраиваемого в штамп, для обеспечения возможности работы универсальных прессов в режиме прессов двойного действия, что значительно расширяет их технологические возможности.

2. Проведенное математическое моделирование в рамках энергетического метода позволило получить аналитические зависимости для определения технологических сил на наиболее нагруженной стадии деформирования;

3. Анализ результатов компьютерного моделирования позволил оценить напряженно – деформированное состояние заготовки при сложном течении металла, установить возможные дефекты формообразования и внести в конструкцию рабочего инструмента коррективы для их устранения.

### **Литература**

1. Горячее прессование поковок в штампах с разъемными матрицами. - Воронеж: ЭНИКМАШ, 1967. - 90с.
2. *Степанский Л.Г.* Расчеты процессов обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1979. - 213с.
3. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. - М. – Л.: Наука, 1969. - 420с.
4. *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1977. - 423с.
5. *Чесноков В.С., Каплунов Б.Г.* Разработка и применение программного обеспечения для автоматизированного проектирования и моделирования процессовковки и горячей штамповки//Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2008. - №9. - С. 36 – 44.
6. *Биба Н.В., Стебунов С.А.* Новости моделирования объемной штамповки — программа QForm.// САПР и графика. -2004. - №9. - с.45-50.

УДК 621.777

## **ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ТРУДНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ШТАМПОВКИ (КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ВЫСАДКИ С ПРЯМЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ)**

Бондаренко Александр Константинович<sup>(1)</sup>, Артёмов Фёдор Евгеньевич<sup>(2)</sup>,  
Жанзаков Павел Кабдукалиевич<sup>(3)</sup>

*Инженер-технолог<sup>(1)</sup>, Инженер-технолог<sup>(2)</sup>, Инженер-технолог Зк<sup>(3)</sup>*

*Отдел обработки металлов давлением*

*Научно-исследовательский институт технологии и организации  
производства двигателей*

*Научный руководитель: И.А.Бурлаков,*

*доктор технических наук, начальник отдела обработки металлов давлением*

В настоящее время одной из основных задач, стоящих перед машиностроением и металлообработкой является повышение качества и точности параметров изготавливаемых деталей при разработке и внедрении новых и совершенствовании существующих технологических процессов. Вместе с этим необходимо достичь снижения трудоемкости и повышения производительности технологических процессов, что, в свою очередь, несомненно, отразится на конкурентоспособности изготавливаемой продукции. Одним из направлений, позволяющих решать поставленные задачи в полном объеме, является холодная объемная штамповка (ХОШ). Более высокие механические характеристики деталей достигаются отсутствием надрезов, направленностью волокон вдоль конфигурации деформированной заготовки, проработкой структуры материала, увеличением прочности деталей за счет упрочнения. По имеющимся данным ХОШ дает возможность:

- увеличить коэффициент использования металла (КИМ) по сравнению с другими видами обработки (в среднем КИМ при ХОШ составляет 0,8-0,9);
- получать высокую точность и качество поверхности деталей;
- повысить надежность, износостойкость и долговечность получаемых изделий;
- снизить трудоемкость изготовления продукции и повысить производительность труда.

К основным недостаткам ХОШ относятся высокое сопротивление пластической деформации, пониженная пластичность большинства металлов при комнатной температуре, что создает тяжелые условия работы штампового инструмента и снижает его стойкость.

Как показывает практика, ХОШ может быть весьма эффективна в мелкосерийном и серийном производствах. К такому типу производства относится авиационное двигателестроение. Материалы, применяемые при производстве ГТД, представляют собой труднодеформируемые коррозионно-стойкие жаропрочные сплавы. Эти материалы отличаются, во-первых, высокой прочностью и низкой пластичностью, и, во-вторых, высокой стоимостью, что создает определенные трудности для производства. Одним из путей повышения эффективности данного вида производства является развитие, совершенствование и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов.

Целью работы являлась разработка новых прогрессивных технологических процессов изготовления полых деталей переменного сечения с обеспечением заданных показателей по точности размеров и шероховатости на основе жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ.

Разработка эффективной технологии невозможна без надежной методики определения деформационных возможностей металла, определения пластичности и оценки вероятности его разрушения (качества отштампованного изделия). Наличие такой методики позволяет повысить производительность, снизить число переходов штамповки, уменьшить расход металла, выбрать наиболее эффективные режимы, особенно скорость деформирования, установить режимы обеспечивающие достижение оптимальных технологических характеристик получаемых деталей. Установить их можно только путем проведения экспериментов по определению пластичности и оценки возможности разрушения материала.

Жаропрочный и жаростойкий сплав на никелевой основе ХН60ВТ находит применение для изделий, работающих при высоких температурах и нагрузках. Применяется для изготовления деталей ГТД и ГТУ, таких как жаровые трубы, форсажные камеры, экраны, лопатки, диски, кольца и др. Детали из этого сплава работают длительно при температурах 900...1000°С.

Свойства и эксплуатационные качества зависят от режима термической обработки. Повышение температуры закалки уменьшает прочностные свойства сплава и повышает пластичность при комнатной температуре (таблицы 1,2). Для чистоты эксперимента все образцы вырезали из сортовых прутков одной плавки.

**Таблица 1. Химический состав сплава ХН60ВТ**

Массовая доля элементов, %											
С	Cr	W	Ti	Ni	Al	Fe	Mn	Si	Cu	S	P
					не более						
0,1	23,5-26,5	13,0-16,0	0,3-0,7	основа	0,5	4,0	0,5	0,8	0,07	0,013	0,013

**Таблица 2. Механические свойства сплава ХН60ВТ (пруток, закалка с 1150...1200°C на воздухе) при  $T_{исп.}=20^{\circ}C$**

$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\delta_5,$ %	$\psi,$ %	E, ГПа
740-880	295-390	45-60	52-60	200

Плотность – 8350 кг/м<sup>3</sup>, сплав.

Для оценки качества штампуемых деталей и определения силовых и кинематических параметров процесса формообразования на стадии проектирования необходимо построить диаграмму пластичности материала, которую представляем в координатах "показатель напряженного состояния - К" - "предельная деформация  $\epsilon_p$ ". Под показателем напряженного состояния понимаем отношение среднего напряжения  $\sigma$  к интенсивности напряжений

$$\sigma_i : K = \sigma / \sigma_i.$$

Для построения диаграммы были проведены следующие серии экспериментов: сжатие, растяжение и кручение.

### Испытание цилиндрических образцов на сжатие

Для испытаний на сжатие были изготовлены цилиндрические образцы с полированными поверхностями, имеющие размеры  $\varnothing 9 \times 14$  мм (рис.1)

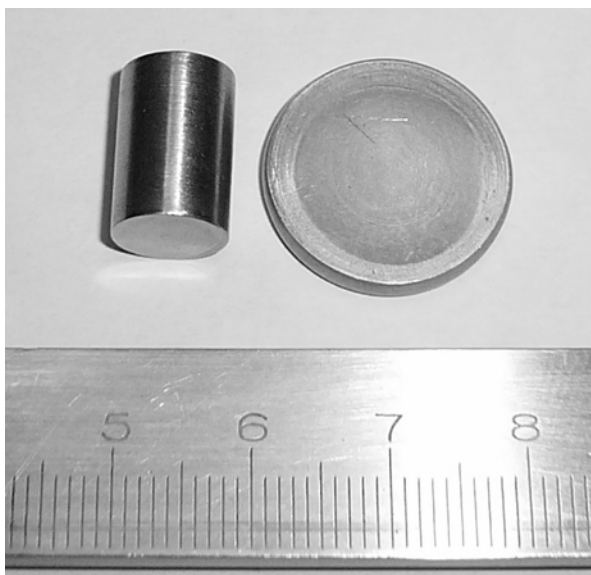


Рис.1 Образцы до и после осадки

Испытание на сжатие образцов проводили на универсальной испытательной машине EU-100 усилием 1 МН и скоростью перемещения рабочей траверсы при рабочем ходе 1 мм/с. Образцы помещали в специально изготовленную втулку-контейнер, служащую направляющей, между закаленными на высокую твердость и отполированными бойками. После каждого шага нагружения, соответствующего определенной силе, пресс

разгружали и проводили замеры общей высоты  $h_i$  и диаметра  $d_i$  образца. Ход траверсы прессы определяли по показаниям индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Для уменьшения контактного трения между образцом и бойками помещали прокладку из листового полиэтилена и медной фольги толщиной 0,035 мм. Через каждые 0,5...1 мм хода прокладки заменяли, обеспечивая полное отсутствие бочкообразности. При осадке фиксировали величину перемещения верхнего бойка и силу. Сжатие осуществлялось до появления трещин на боковой поверхности образцов (рис.2)



Рис.2 Место разрушения осажённого образца

По результатам проведенных испытаний, построили кривую упрочнения в координатах  $\epsilon_i - \sigma_i$  (рис.3)

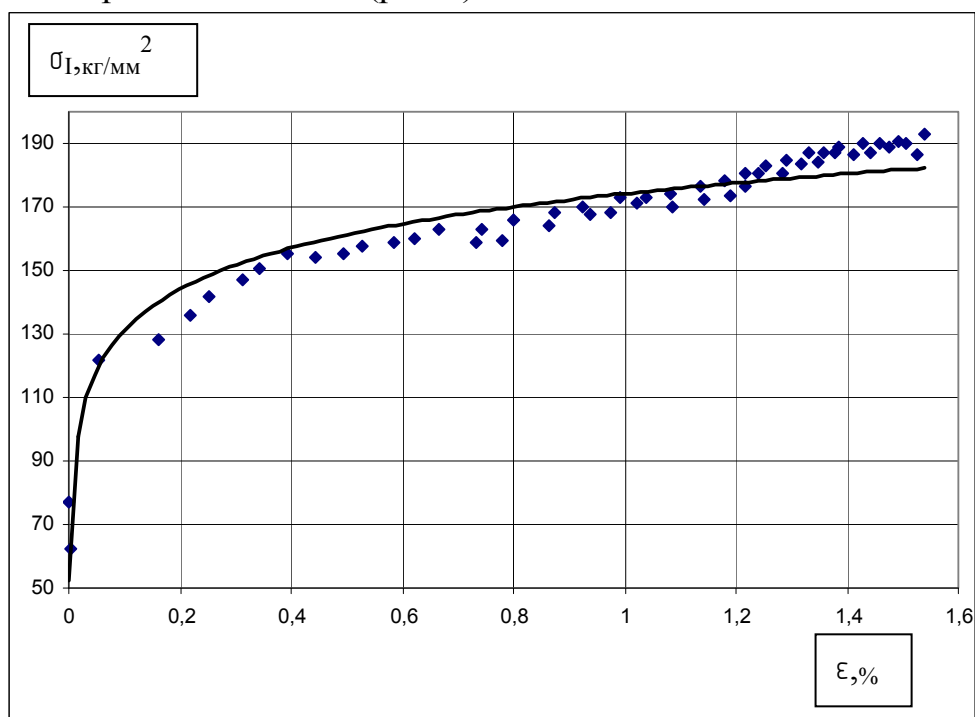


Рис.3 Кривая упрочнения сплава ХН60ВТ, построенная по результатам испытаний на сжатие

### Испытание цилиндрических образцов на растяжение и кручение

Образцы для испытаний на растяжение и кручение были изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497-84 и имели диаметр рабочей части  $d_0=6$  мм, длину рабочей части  $l_0=60$  мм (рис.4).

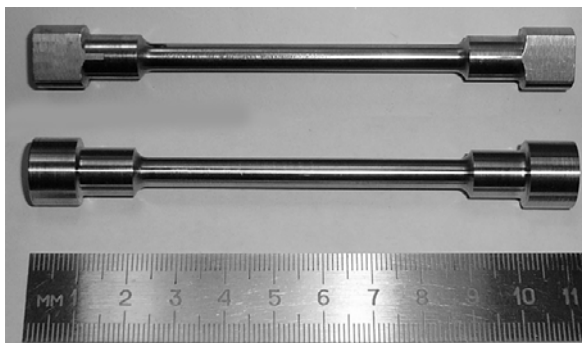


Рис.4 Образцы для испытаний на растяжение и кручение

Рабочую поверхность всех образцов полировали, чтобы избежать влияния на результат концентраторов напряжений в виде следов резания. Растяжение образцов проводили на универсальной испытательной машине Р20 силой 200 КН. Геометрические размеры образцов перед деформацией измерялись микрометром с точностью 0,01 мм, после разрыва образца размеры поперечного сечения в шейке измеряли с помощью инструментального микроскопа с ценой деления 0,01 мм. Для проведения эксперимента на кручение были изготовлены захватные головки, с помощью этих головок был устранен возможный перекокс цилиндрической части образца. Кручение образцов осуществляли на машине марки КМ50-1, имеющей максимальный крутящий момент 5 МН, регистрируя угол поворота  $\varphi$  подвижного захвата и крутящий момент  $M$ . Усредненную текущую деформацию поверхностного слоя определяли по формуле:

$$\varepsilon_i = \varphi \times r / \sqrt{3}l$$

где:  $r$  и  $l$  - радиус и длина рабочей части образца.

После разрушения образца предельную деформацию определяли согласно зависимости  $\varepsilon_p = \varphi_p / \sqrt{3}$ , где  $\varphi_p$  - угол поворота продольной риски, нанесенной типографским способом на поверхность исходного образца вдоль его оси. Этот угол измеряли с помощью инструментального микроскопа. Показатель напряженного состояния во всем объеме образца на всех стадиях его скручивания до разрушения равен нулю. По результатам испытаний была построена диаграмма пластичности (рис.5)

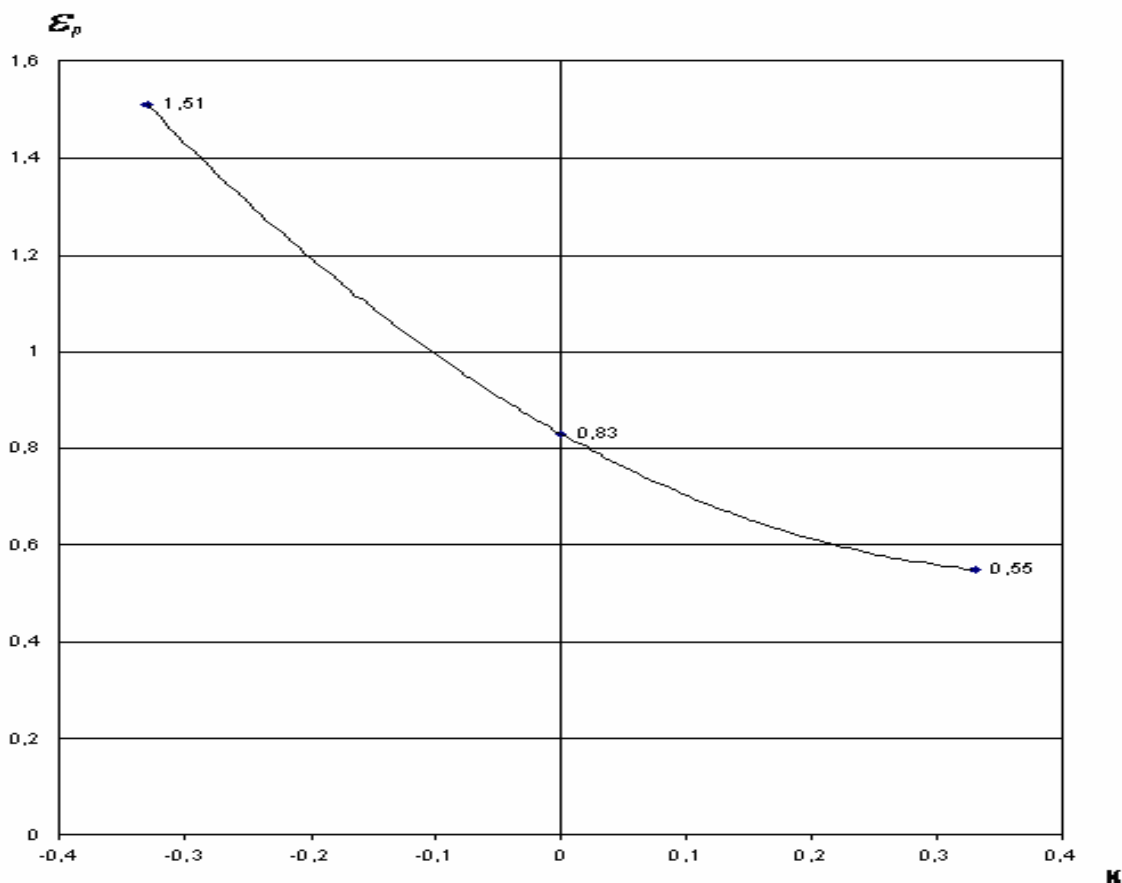


Рис. 5 Диаграмма пластичности никелевого сплава

### Особенности кинематики течения и напряженно-деформированного состояния

В данной работе приведены результаты по разработке технологической схемы получения полых заготовок с широким фланцем со сквозным отверстием из жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ. Рассмотрим построение технологического процесса изготовления ряда типовых полых деталей с широким фланцем с глухим отверстием из жаропрочного никелевого сплава. Основные геометрические параметры: диаметр фланца: 22...28 мм, толщина стенки детали: 1,0...2,5 мм, высота детали: 6...10 мм. В настоящее время детали подобных типоразмеров изготавливают методом многооперационной вытяжки из листовой заготовки, с промежуточными термообработками. Такая схема изготовления характеризуется большой номенклатурой штампового инструмента и высокой трудоемкостью. В качестве альтернативы существующему методу, нами было предложено изготавливать подобные детали методом холодной объемной штамповки, что позволило уменьшить количество технологических операций, существенно снизить трудоемкость и номенклатуру штампового инструмента.

Построение технологического процесса осуществляется по схеме: штамповка полых заготовок с широким фланцем со сквозным отверстием из цилиндрической заготовки с отверстием (рис. 6).



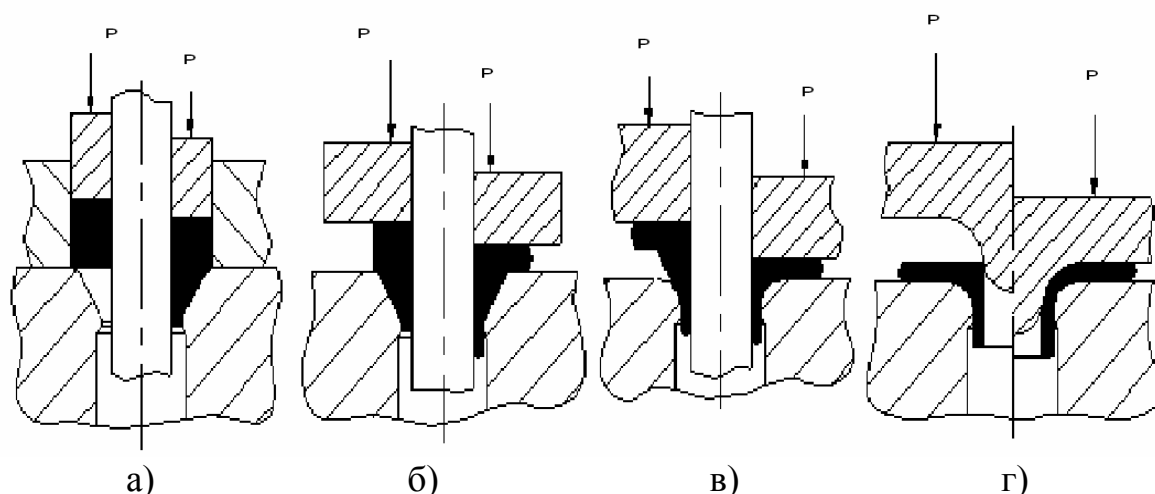


Рис. 6. Схемы технологических операций штамповки полых заготовок с широким фланцем со сквозным отверстием из цилиндрической заготовки с отверстием: а) прямое закрытое выдавливание; б) комбинированный процесс выдавливания с высадкой; в) комбинированный процесс выдавливания с высадкой; г) калибровка.

При реализации приведенной схемы (рис. 6) первая операция (рис. 6, а) является подготовительной и представляет собой классическое прямое закрытое выдавливание кольцевой заготовки в полость конической матрицы. Деформирование осуществляли до момента начала оформления цилиндрического отростка детали в зазоре между конусной матрицей и оправкой. Вторая операция (рис. 6, б) – комбинированный процесс прямого выдавливания с высадкой. Торцевую поверхность заготовки, контактирующую с пуансоном оставляли без смазки, с целью увеличения коэффициента трения, вследствие чего, металл интенсивнее течет в зазор между конической матрицей и оправкой. Третья операция – частичное выдавливание цилиндрического отростка с оформлением наружного радиуса. В четвертой операции осуществляется оформление и калибровка внутреннего радиуса детали.

### **Исследование комбинированного процесса высадки с прямым выдавливанием**

Наиболее сложным процессом в представленной схеме является комбинированный процесс высадки с прямым выдавливанием. При варьировании различных геометрических параметров, а также условий трения на границах контакта инструмента и заготовки мы можем добиться необходимого для нас результата.

Для схемы (рис. 7) формоизменение заготовки 5 происходит пуансоном 4 на оправке 1. Заготовка имеет возможность истечения в радиальном (осадка между матрицей 2 и пуансоном 4) и осевом (в зазор между матрицей 2 и оправкой 1) направлениях.

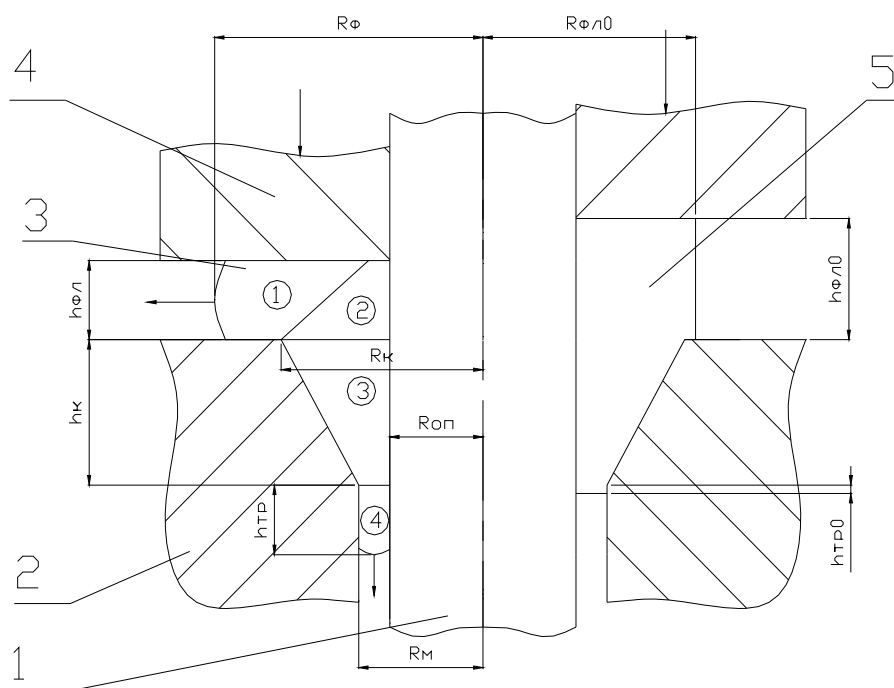


Рис. 7. Схема комбинированного процесса высадки с прямым выдавливанием: 1 – оправка; 2 – матрица; 3 – получаемая деталь; 4 – пуансон; 5 – исходная заготовка.

При данной схеме деформации кинематика течения металла в процессе формоизменения неоднозначна, т.к. нельзя заранее определить, как будет распределяться по сечению заготовки поле скоростей, и следовательно в каком направлении будет истекать металл. На разных стадиях процесса поле скоростей не постоянно и меняется в зависимости от изменения геометрии заготовки и внутренних сил, действующих в различных зонах сечения. Как видно, имеет место радиальное течение металла в сторону открытой периферической части – во фланец (рис. 7).

Сечение рассматриваемой заготовки на стационарной стадии процесса можно условно разбить на 4 основные зоны течения металла:

Зона 1 - включает радиальное течение металла в сторону открытой периферической части – во фланец. Векторы скоростей перемещения материальных точек имеют криволинейную траекторию, которая берет начало от торцевой поверхности контакта заготовки с пуансоном

Зона 2 – осевое течение металла в коническую часть матрицы. Положение границы поверхности раздела течения материальных точек металла с зоной 1 зависит от текущей высоты фланца  $h_{фл}$ . Нижней границей зоны является продолжение горизонтальной плоскости матрицы.

Зона 3 - осевое течение металла в конической части матрицы в зазор между оправкой и матрицей. Металл в данной зоне оказывается запертым и имеет возможность истечения только в направлении зазора между оправкой и матрицей.

Зона 4 - осевое течение металла в зазоре между оправкой и матрицей – является жесткой областью.

Существенное влияние на процесс формоизменения при данной схеме имеет поверхностное контактное трение. Значимого результата по распределению объема металла можно добиться при варьировании коэффициентом трения на границе контакта пуансона 4 с заготовкой 5 (рис. 7). Изменение коэффициента трения в диапазоне от  $\mu=0,1$  до  $\mu=0,8$  позволяет перераспределять металл или во фланец, или в трубку (в зазор между матрицей и оправкой). На рис. 8 представлены результаты моделирования, отражающие данный эффект.

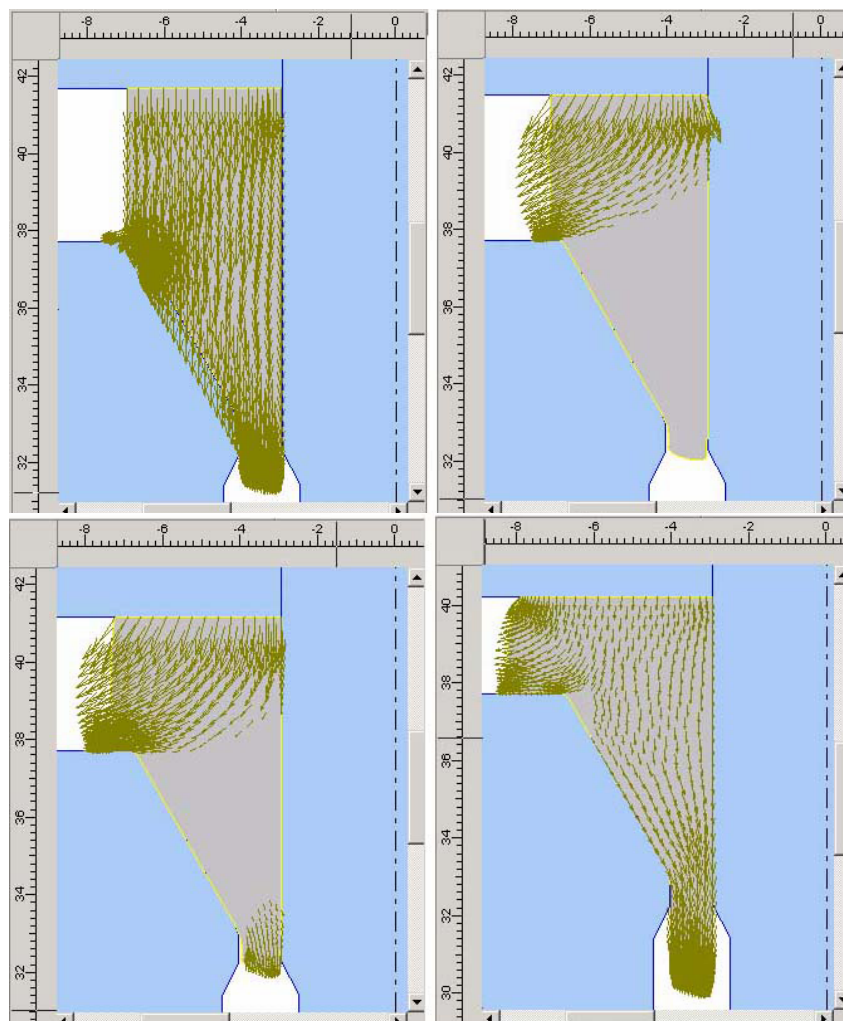


Рис. 8. Поэтапное распределение векторного поля скоростей при комбинированном процессе прямого выдавливания с высадкой

Кроме того, изменение коэффициента трения позволяет влиять на устойчивость заготовки в процессе деформирования. Так увеличение трения на границе контакта пуансона 4 с заготовкой 5 не позволяет металлу “отходить” от оправки 1 и, тем самым теряя устойчивость, образовывать складку. Но следует иметь в виду, что при определенных соотношениях начальной высоты фланца и диаметра, снижение коэффициента трения

приводит к потере устойчивости заготовки, неисправимому искажению геометрии, и как следствие к дефекту.

Таким образом, для схемы комбинированного процесса высадки с прямым выдавливанием (рис. 7) изменение коэффициента трения на поверхности контакта пуансона с заготовкой позволяет управлять течением металла, формируя или фланец или трубку, в зависимости от требуемой конфигурации.

На рис. 9 и 10 приведены результаты, полученные при моделировании в системе Q-Form и экспериментальным путем, которые показывают полное совпадение геометрии деталей.

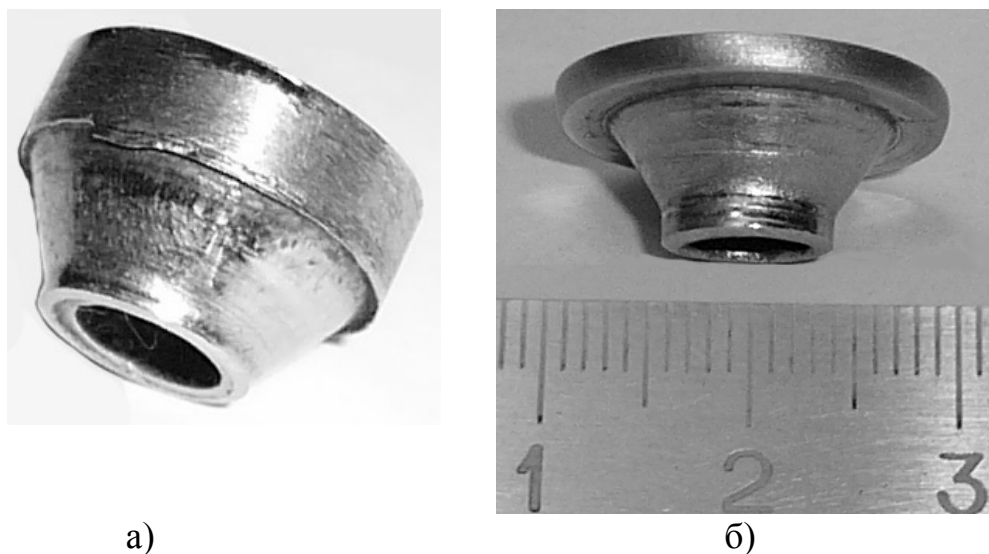


Рис. 9 Экспериментальные образцы: а) исходная заготовка; б) деталь, полученная методом комбинированного прямого выдавливания с высадкой.

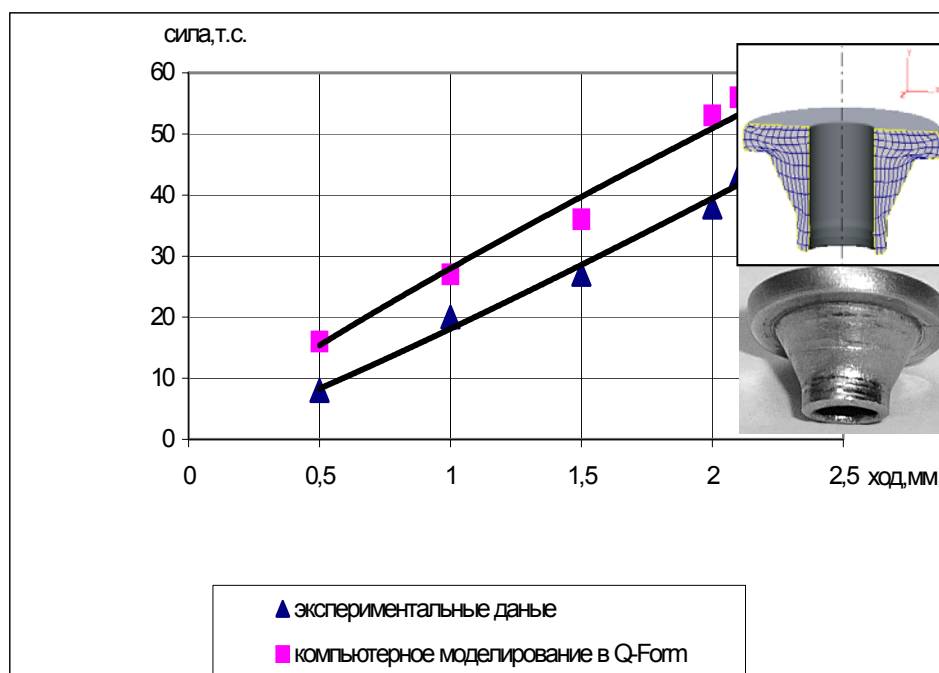


Рис 10. Сравнение зависимости усилия деформирования от хода ползуна

Сравнение энерго-силовых параметров процесса показывает завышенные показания усилия деформирования при моделировании в системе Q-Form, что можно попытаться объяснить тем, что при моделировании оправка 3 (рис. 1) является неподвижной и тем самым создает дополнительное сопротивление течению металла, в отличие от реальной оснастки, где оправка свободно перемещается вместе с металлом.

В заключение следует отметить, что полученные результаты показали принципиальную возможность получения данного типа деталей по предложенной схеме деформирования.

### **Вывод**

Разработана модель процесса комбинированной штамповки полых деталей с широким фланцем, позволившая на основе изучения пластичности и оценки возможности разрушения жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ получать бездефектные детали с заданными параметрами.

### **Литература**

1. “Марочник сталей и сплавов”. Под ред. Зубченко А.С. М. Машиностроение 2001.
2. *Ф.Ф. Химушин*. “Жаропрочные стали и сплавы”. Металлургия М. 1964 г.
3. *Пасько А.Н.* «Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок» ТулГУ. Тула 2004. 251 стр.

УДК 621.73.012

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРЕССА ДЛЯ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВКИ КЛАПАНА ЭЛЕКТРОВЫСАДКОЙ**

Валькова Светлана Олеговна

*Студентка 6 курса*

*кафедра «Технологии обработки давлением»*

*Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: А.М. Дмитриев,*

*Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор кафедры*

*«Технологии обработки давлением»*

### **Аннотация**

Рассматривается один из путей повышения производительности и экономичности при изготовлении детали клапана. Обеспечение высокой экономичности предполагается достичь путем использования электровысадочной машины, с последующей доштамповкой заготовки на КГШП, что позволяет не нагревать всю заготовку и соответственно снижает припуски на стержневую часть поковки, и как следствие уменьшение расхода материала на изготовление детали.

### **Введение**

В условиях современных экономических отношений, к кузнечно-штамповочному производству предъявляется ряд требований, таких как: производительность, универсальность, экономичность, надежность.

В работе сопоставлены технологические процессы изготовления клапана, предложен оригинальный технологический процесс штамповки, в результате математического моделирования установлены наилучшие параметры процесса, приведена разработанная конструкция специализированного пресса.

В данной работе рассматривается один из путей повышения производительности и экономичности при изготовлении детали клапана (рис. 1).

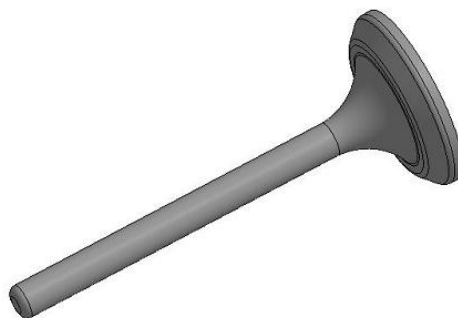


Рис. 1. Деталь клапана,  
материал: сталь 40Х

### Основные идеи

Обеспечение высокой экономичности предполагается достичь путем использования электровысадочной машины, с последующей доштамповкой детали на КГШП, что позволяет не нагревать всю заготовку и соответственно снижает припуски на стержневую часть поковки, и как следствие уменьшение расхода материала на изготовление детали.

В процессе работы были рассмотрены различные варианты получения поковок типа клапана, приведенные на рис. 2-5:

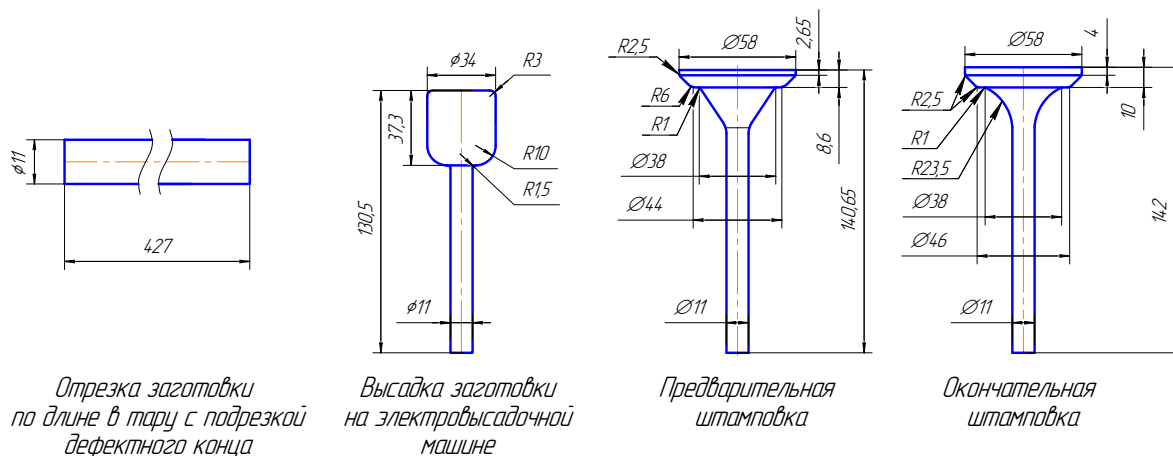
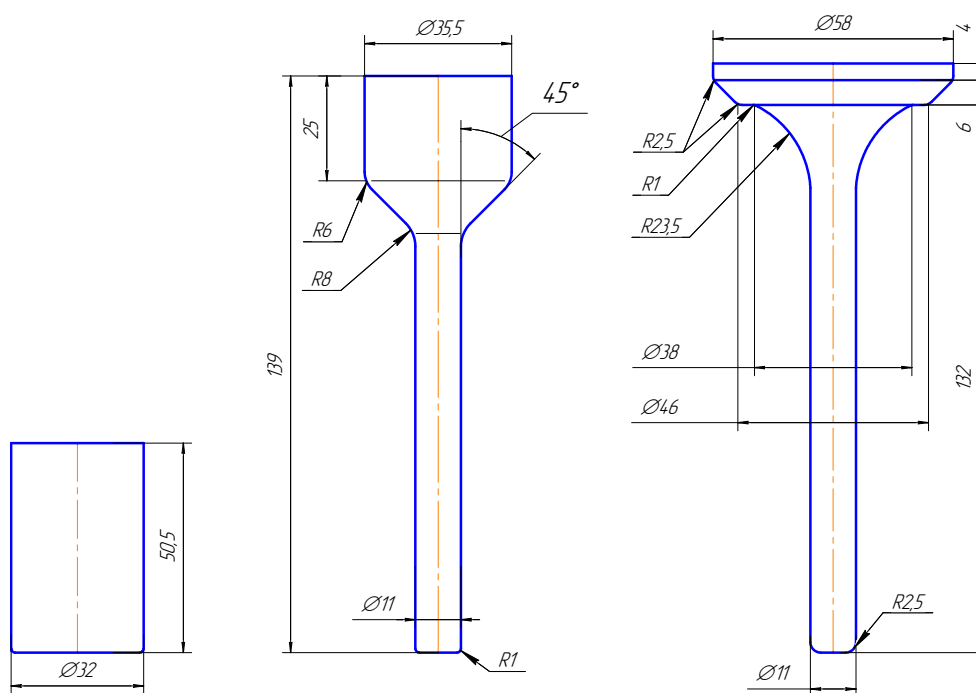


Рис. 2. Электровысадка части – тарелки и последующая ее доштамповка на КГШП

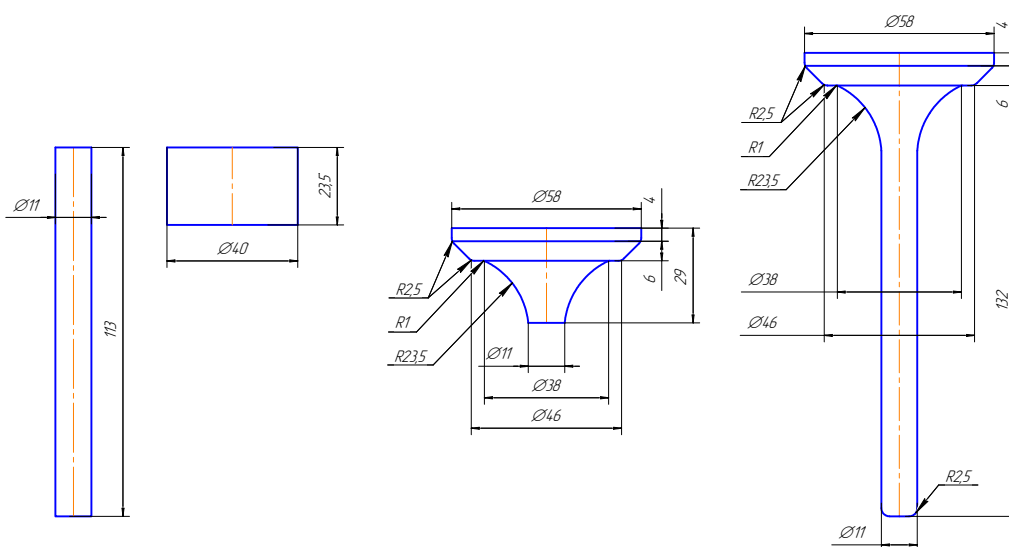


*Заготовка*

*I переход штамповки.*

*II переход штамповки.*

Рис. 3. Штамповка заготовки на КГШП за два перехода из цилиндрической заготовки



*Заготовка сталь 4Х9С2, Заготовка сталь 5Х20Н4АГ9*

*Выдавливание на КГШП тарелки*

*Контактная сварка тарелки со стержнем*

Рис. 4. Получение детали путем сварки из двух частей: 1-тарелка, получаемая выдавливанием на КГШП, 2 – пруток с диаметром стержневой части необходимой поковки



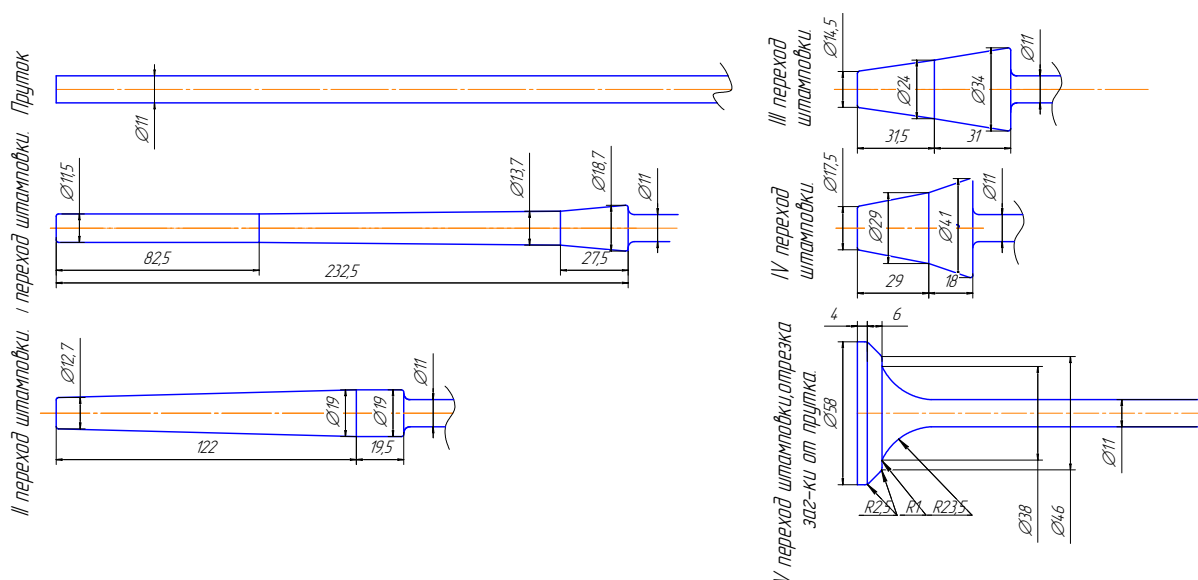


Рис. 5. Штамповка заготовки на ГКМ за пять переходов, с последующей отрезкой заготовки от прутка

В процессе исследования были промоделированы два метода получения поковки клапана: приведенные на рис. 2,3 и установлено, что процесс совмещения электровысадки с доштамповкой на КГШП более технологичен и рационален по сравнению с простым выдавливанием за два перехода: поскольку не требует нагрева всей заготовки. Это улучшает качество поверхности в стержневой части при методе электровысадки.

При проектировании этого процесса задача сводится к выбору наилучшего режима выполнения формоизменяющей операции электровысадкой. Выбирается оптимальный вариант электровысадки стержня длиной 427 мм и  $D=11$ мм для последующей доштамповки на КГШП и получения детали типа клапан из стали 40Х в зависимости от различных параметров.

Строится математическая модель, для которой выбираются факторы варьирования (табл. 1):

**Таблица 1. Факторы и уровни их варьирования**

№	фактор	$X_i$	$F_i$
1	расстояние между электродами	30 мм	0
		25 мм	1
2	токи на первичной обмотке трансформатора	50 А	0
		57 А	1
		58 А	2
3	скорость движения верхнего инструмента	10,2 мм/с	0
		10,34 мм/с	1
		10,8 мм/с	2

Математическая модель:

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2$$

При планировании эксперимента используем симметричный план дробного факторного эксперимента главных эффектов, при котором не оценивается взаимное влияние факторов. Таким образом, матрицу симметричного плана  $3^4 // 9$  (табл. 2) преобразуем в матрицу несимметричного плана главных эффектов  $2 \times 3^2 // 9$  (табл. 3), которая также является ортогональной и симметричной.

**Таблица 2. Матрица симметричного плана**

№ опыта	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
1	0	0	0	0
2	1	0	2	2
3	2	0	1	1
4	0	1	2	1
5	1	1	1	0
6	2	1	0	2
7	0	2	1	2
8	1	2	0	1
9	2	2	2	0

**Таблица 3. Матрица плана  $2 \times 3^2 // 9$  эксперимента  $3^4 // 9$  в кодах F<sub>i</sub> проводимого эксперимента в кодах F<sub>i</sub>'**

№ опыта	F <sub>1</sub> '	F <sub>2</sub> '	F <sub>3</sub> '	F <sub>4</sub> '
1	0	0	0	0
2	0	0	2	2
3	1	0	1	1
4	0	0	2	1
5	0	0	1	0
6	1	0	0	2
7	0	1	1	2
8	0	1	0	1
9	1	1	2	0

С использованием полученной матрицы плана  $2 \times 3^2 // 9$  в кодах F<sub>i</sub>', составлена матрица плана экспериментов  $2 \times 3^2 // 9$  в натуральном масштабе (табл. 4).

**Таблица 4. Матрица плана экспериментов  $2 \times 3^2 // 9$  проводимого эксперимента в натуральном масштабе**

№ опыта	X1	X2	X3
1	30	50	10,2
2	30	58	10,8
3	30	57	10,34
4	30	58	10,34
5	30	57	10,2
6	30	50	10,8
7	25	57	10,8
8	25	50	10,34
9	25	58	10,2

После составления матрицы плана в натуральном масштабе все опыты промоделированы в программном комплексе Qform.

Для получения наилучших параметров штамповки электровысадкой, в качестве оценки использованы два выходных параметра:

$y_1$  - максимальный диаметр полученного утолщения,

$y_2$  - наилучшая температура по окончании процесса электровысадки.

Матрица плана экспериментов переведена в кодированный масштаб (табл. 5) по переводным формулам:

$$x_i = k_i \cdot (X_i - A_i),$$

где  $A_i$  - свободный член;

$k_i$  - переводной коэффициент;

$$A_i = -\frac{\sum_{j=1}^N x_j}{N};$$

$$k_i = k_i' \cdot (x_i^2 + a_i \cdot x_i + c_i);$$

$$c_i = -\frac{\sum_{j=1}^N x_j^2}{N};$$

$$a_i = -\frac{\sum_{j=1}^N x_j^3}{\sum_{j=1}^N x_j^2}.$$

**Таблица 5. Матрица плана экспериментов  $2 \times 3^2 // 9$  в кодированном масштабе**

№ оп.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$z_2$	$z_3$	$y_1$	$\hat{y}_1$	$y_2$	$\hat{y}_2$
1	1	1	-5	-1	0,05	0,5	41,26	41,66	993	955,8767
2	1	1	3	1,4	0,34	0,16	30,28	30,78	1686	1607,197
3	1	1	2	-0,4	-0,39	-0,66	34,8	35,36	1345	1406,426
4	1	1	3	-0,4	0,34	-0,66	35,8	35,2	1471	1431,596
5	1	1	2	-1	-0,39	0,5	40,9	40,48	1078	1132,062
6	1	1	-5	1,4	0,05	0,16	32,6	32,14	1366	1405,843
7	1	-2	2	1,4	-0,39	0,16	34	33,95	1238	1276,961
8	1	-2	-5	-0,4	0,05	-0,66	39,5	39,5	947,2	925,1745
9	1	-2	3	-1	0,34	0,5	43,3	43,3	869,1	852,165

Коэффициенты математической модели рассчитаны по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N Y_u \cdot x_{iu}}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}$$

где  $i$  – номер фактора,  $u$  – номер опыта,  $N$  – число опытов плана.

Получены математические модели:

$$y_1 = 36,937 - 0,997 \cdot x_1 - 0,168 \cdot x_2 - 3,618 \cdot x_3 + 0,083 \cdot x_4 + 2,535 \cdot x_5$$

$$y_2 = 1221,47 + 101,68 \cdot x_1 + 25,169 \cdot x_2 + 166,73 \cdot x_3 + 130,96 \cdot x_4 - 149,88 \cdot x_5$$

По этим моделям получили хорошее сходство выходных параметров (табл. 5) с результатами эксперимента.

Проведен статистический анализ математической модели, который позволяет:

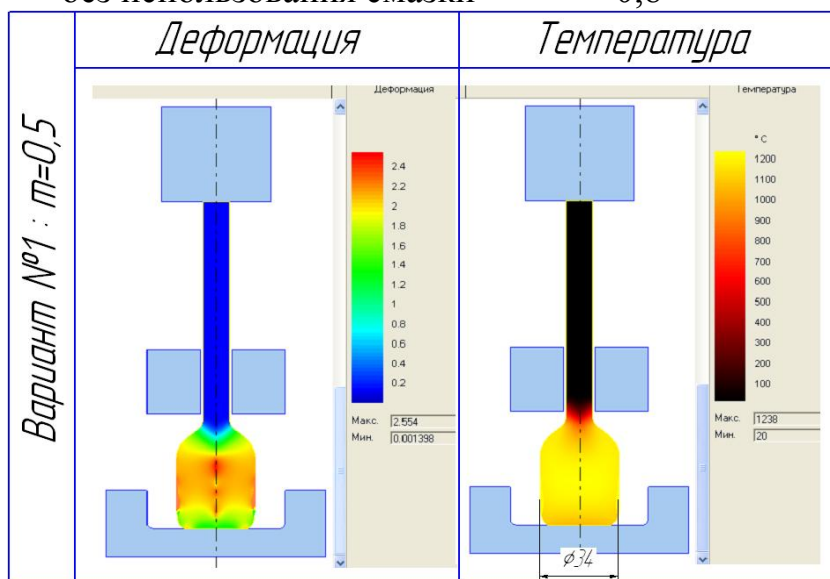
- оценить значимость коэффициентов математической модели,
- оценить адекватность математической модели.

Если значимость некоторых их коэффициентов не подтвердилась, то их можно исключить из математической модели без пересчета других коэффициентов. Необходимость пересчета других коэффициентов исключается благодаря тому, что применен ортогональный план. После исключения коэффициентов освобождается дополнительная степень свободы для оценки адекватности математической модели. Эта оценка становится более достоверной.

Поскольку статистический анализ базируется на дисперсии воспроизводимости эксперимента  $s_y^2$ , то один опыт из матрицы плана проведен несколько раз.

В данной работе опыт №7 и моделируется повторно 3 раза (рис. 6), изменяя типы смазок, используемые при моделировании в программном комплексе Qform:

обозначение:	фактор трения:
g-st015 - графит + вода	0,15
gw-st-h - графит + вода	0,4
glgrp-sst-h - стекло + графит	0,1
no-st-h - без использования смазки	0,8



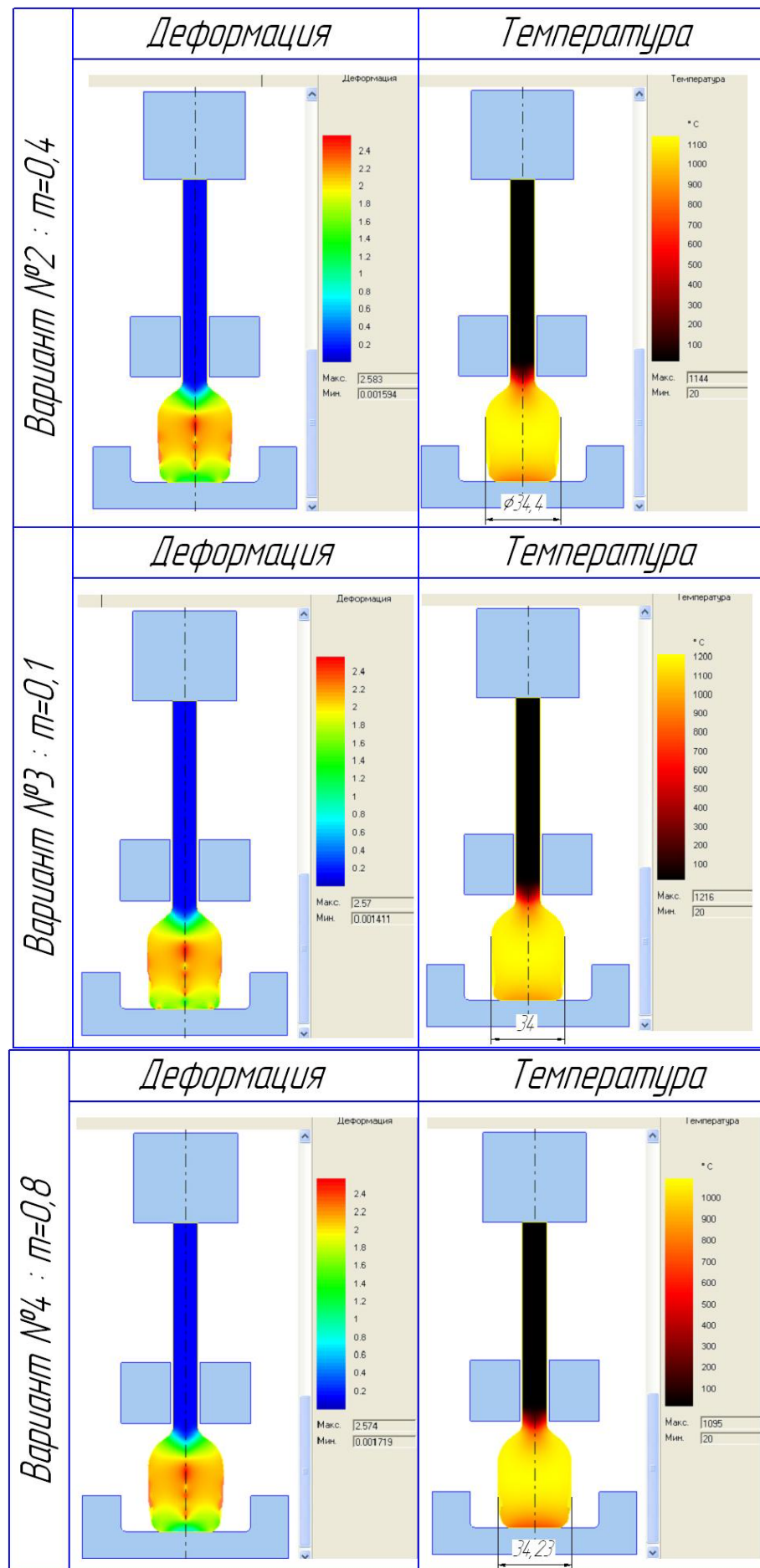


Рис. 6. Варианты моделирования при повторении опыта

Для оценки значимости коэффициентов математической модели:

1. рассчитано среднее арифметическое результатов повторных опытов  $\bar{y}$ ;
2. рассчитана дисперсия воспроизводимости эксперимента

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1}$$

где  $y_i$  - результат  $i$ -го повторения опыта;

$\bar{y}$  - среднее арифметическое значение повторных опытов;

$f_1 = N - 1 = 4 - 1 = 3$  - число степеней свободы при определении дисперсии.

3. рассчитаны дисперсии оценок коэффициентов математических моделей:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{i=1}^N x_{i0}^2}$$

4. рассчитаны доверительные интервалы коэффициентов регрессии:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{b_i}$$

$\alpha$  - статистическая значимость критерия Стьюдента,

$f_1$  - табличное значение квантилей  $t$  -распределения (распределения Стьюдента).

Коэффициенты регрессии признаны статистически значимыми, если их абсолютная величина не менее значения доверительного интервала, т.е. выполняется неравенство:

$$|b_i| \geq \Delta b_i$$

Получены математические модели со статистически значимыми коэффициентами:

$$y_{1м} = 36,937 - 0,997 \cdot x_1 - 0,168 \cdot x_2 - 3,618 \cdot x_3 + 2,535 \cdot z_3,$$

$$y_{2м} = 1221,47 + 101,68 \cdot x_1 + 25,169 \cdot x_2 + 166,73 \cdot x_3 - 149,88 \cdot z_3$$

Подстановкой в полученную математическую модель значений для  $x_1$  и  $x_2$  из матрицы плана экспериментов в кодированном масштабе определены оптимальные значения для 3-го фактора:

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_3}, \quad \frac{\partial y_2}{\partial x_3}$$

$$x_3 = 0,98 \rightarrow X_3 = 10,69 \text{ мм/с},$$

$$x_3 = 0,82 \rightarrow X_3 = 10,65 \text{ мм/с}$$

Учет полученных скоростей движения верхнего инструмента в обеих математических моделях, позволил определить значение скорости равное 10,67 мм/с при расстоянии между электродами равным 25мм и силе тока на

первичной обмотке равной 57А, при которой получается оптимальный диаметр утолщения.

Для оценки адекватности математической модели:

рассчитана дисперсия адекватности математической модели:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{ирасч} - Y_{иксп})^2}{f_2}$$

где  $f_2 = N - k'$  - число степеней свободы

$k'$  - число коэффициентов мат. модели, признанных значимыми, расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{y_1}^2}$$

При этом  $F_p < F_m$

Сравнение полученных результатов с табличным значением критерия Фишера, при уровне значимости и числе степеней свободы показало, что гипотеза об адекватности модели на 0,5 % уровне значимости не отвергается.

Таким образом, произведен расчет наилучших параметров штамповки электровысадкой, для чего построено уравнение регрессии по результатам компьютерного эксперимента.

Таким образом, перспективным способ реализации данной задачи является электровысадка, которая позволяет избежать потери устойчивости заготовки, сократить количество технологических переходов на ее изготовление, также не требует дополнительных затрат на оборудование для нагрева. Однако электровысадка менее производительна, чем последующая доштамповка на КГШП в режиме автоматических ходов. Для выравнивания их производительности создается специализированный пресс - двенадцатипозиционная электровысадочная машина (рис. 7).

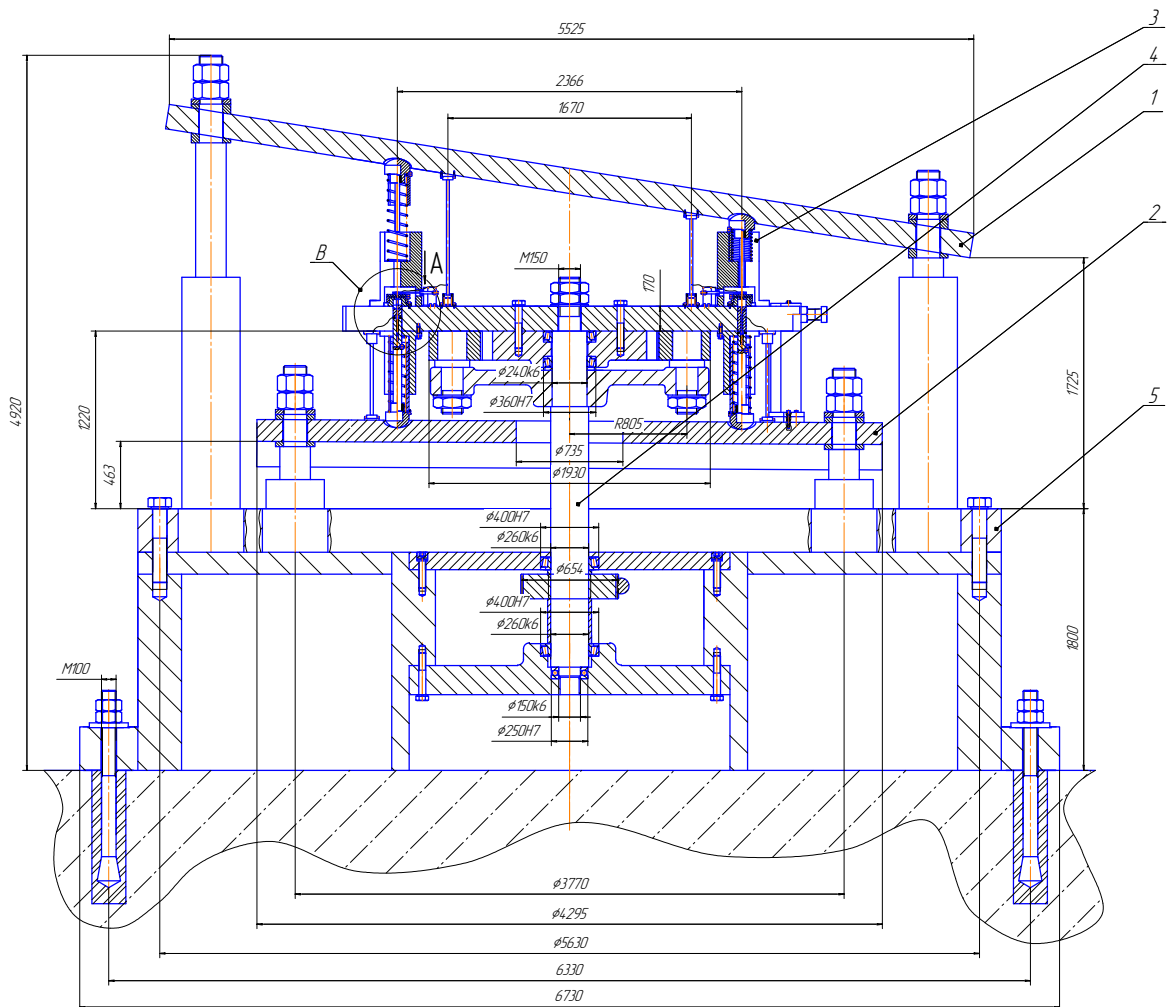


Рис. 7. Двенадцатипозиционная электровысадочная машина

Основные узлы конструкции пресса:

1. верхняя плита,
  2. нижняя плита,
  3. ротор (рис. 8),
  4. привод,
  5. станина.
- B (1,2,5)*

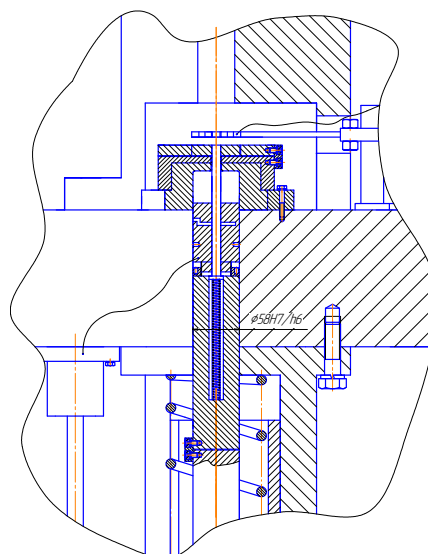




Рис. 8. Ротор

На рис. 9 показано устройство приведения электродов в контакт с заготовкой.

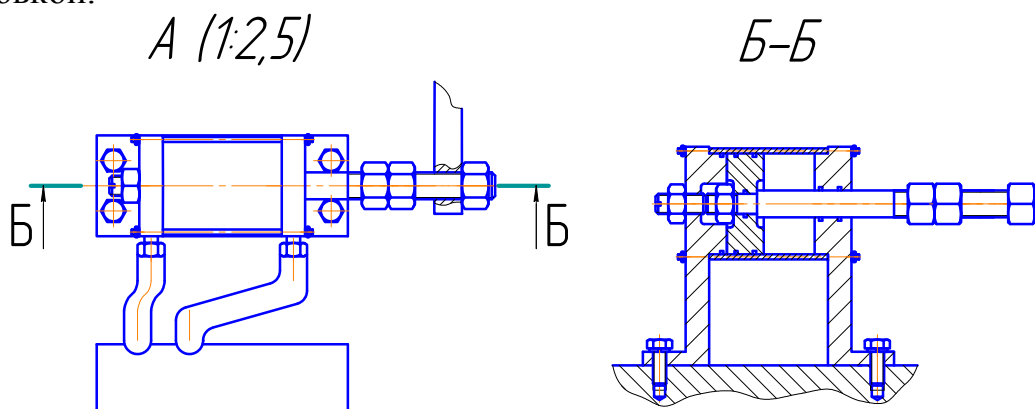


Рис. 9. Электроды

### Выводы

Эксплуатация электровысадочных машин совместно с КГШП для технологического процесса получения клапана за один переход позволяет:

- повысить производительность за счет сокращения числа переходов;
- упростить штамповую оснастку из-за ликвидации предварительных переходов и значительно сократить ее расход;
- уменьшить расход металла, поскольку штамповка точных по объему утолщений позволяет уменьшить заусенцы и облой;
- улучшить структуру материала за счет применения одного нагрева;
- упразднить громоздкие нагревательные устройства;
- обеспечить возможность высадки стержней сколь угодно малого диаметра.

## Литература

1. Ковка и штамповка. Справочник в 4 т., Т2. Горячая штамповка /Под ред. *Е. И. Семенова*. Машиностроение 1986г.
2. Ковка и штамповка. Справочник в 4 т., Т1. Материалы и нагрев /Под ред. *Е. И. Семенова*. Машиностроение 1985г.
3. *Зиновьев И. С., Кондратенко В. Г., Чередниченко А. В.* М/у к домашнему заданию по «Технологии ГОШ», 2000г.
4. *А. П. Атрошенко* «Механизация и автоматизация горячей штамповки», Машиностроение. 1965г.
5. Ковка и объемная штамповка стали. Справочник в 2Т. Т1./ Под ред. *М.В. Сторжева* Машиностроение 1967г. М.
6. *В.Н. Субич, Н.А. Шестаков* У/п «Расчет и проектирование технологических процессов объемной штамповки» МГИУ М. 2003г.
7. *П.И. Полоухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин* Справочник «Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов» Металлургия 1976г.
8. Расчет технологических процессов элетровысадки. ЭНИКМАШ, 1982г.
9. Кузнечно-штамповочное оборудование. /Под ред. *Ю.А. Бочарова*, Москва 2008г.
10. Моделирование кузнечно-штамповочного оборудования средствами программного комплекса анализа динамических систем ПА9. /Под ред. *Е. Н. Складчикова*, кафедра МТ6 2005г.
11. Применения программ ANSYS и LSDYNA для анализа машин и технологических процессов обработки давлением методом конечных элементов. /Под ред. *А. В. Власова, М. А. Горькова*, Москва 2008г.
12. *Новик Ф.С., Арсов Я.Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. –М.: Машиностроение–Техника, 1980. – 304 с.
13. QFORM 2D/3D «Программа моделирования объемной штамповки» Версия 4.3 Учебное пособие ООО «КванторФорм» 1991-2006. – 55стр.

УДК 621.072

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЯ СТРУКТУРНОНЕОДНОРОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Митюшкин Антон Александрович <sup>(1)</sup>, Груздев Дмитрий Павлович <sup>(1)</sup>, Сизов Николай Александрович <sup>(1)</sup>, Кокорин Алексей Валерьевич <sup>(2)</sup>

Аспирант <sup>(1)</sup>, студент <sup>(2)</sup>,  
кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»  
ГОУ ВПО Ульяновский государственный технический университет

Научный руководитель: доц., к.т.н. В.Н. Кокорин, заведующий кафедрой  
«Материаловедение и обработка металлов давлением»

Характерной тенденцией современного промышленного производства является создание новых машин и механизмов с высокими рабочими параметрами на основе использования заготовок и деталей с высоким уровнем технологических и потребительских свойств.

Основным потребителем высокоплотных заготовок и деталей являются отрасли автомобилестроения, машиностроения, прокатки и ряд других. Высокоплотные механические смеси могут применяться в качестве исходных заготовок при изготовлении металлопроката, при получении изделий типа «фольга», в процессах интенсивного пластического деформирования (формообразования) по схемам динамическое горячее прессование (ДГП), гидроштамповки, холодная объемная штамповка (ХОШ); в качестве брикетов (вторичное сырье) в процессах промышленного рециклинга твердых техногенных отходов металлургических комбинатов; в качестве деталей конструкционного назначения.

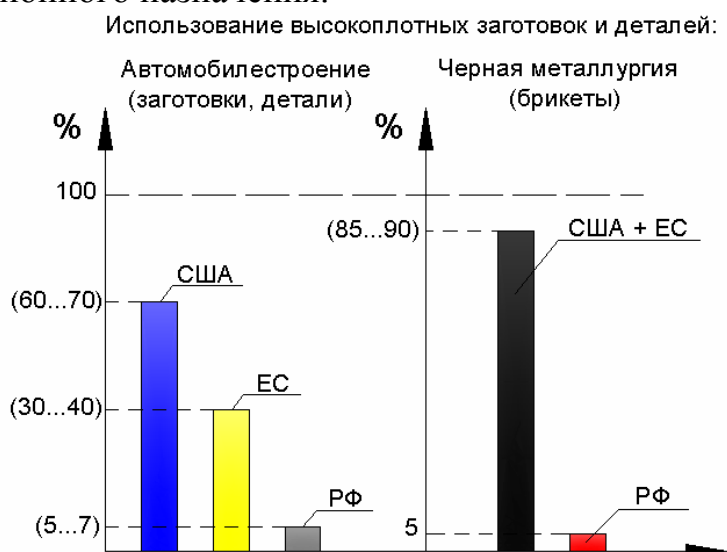


Рис. 1. Сравнительный анализ использования высокоплотных заготовок и деталей

На диаграмме (рис. 1.) представлено использования изделий из порошковых материалов по отраслям в промышленно развитых странах мира. Следует отметить, процент использования изделий из порошковых материалов в РФ существенно отстает от США и стран ЕС.

Развитие порошковой металлургии основывается в значительной мере на разработке и использовании новых прогрессивных технологий консолидации дисперсных металлов, направленных на существенную минимизацию остаточной пористости и созданию благоприятной структуры материала.

В экспериментальных исследованиях, проведенных на кафедре «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета, изучались вопросы структурообразования при прессовании структурнонеоднородных плотноупакованных механических смесей из железосодержащих порошковых материалов в присутствии жидкой фазы (вода, ацетон). Использована жесткая прессформа, состоящая из обоймы, верхнего пуансона и оправки. Прессование осуществлялось на гидравлическом прессе модели ПГ-60 с использованием односторонней схемы приложения статической нагрузки. Выбор диапазона прикладываемых усилий определялся природой использованного материала (железный порошок АНС100.29).

В экспериментах применялись следующие механические смеси:

- железный порошок;
- железный порошок и жидкая фаза (вода) в пропорции (85:15), исходная влажность  $W_0 = 15\%$ ;
- железный порошок и жидкая фаза (ацетон) в пропорции (85:15), исходная влажность  $W_0 = 15\%$ ;

Выбор жидкой фазы определяется различной вязкостью применяемых жидкостей.

По результатам экспериментов построены экспериментальные кривые уплотняемости трех видов механических смесей (рис. 2.), обоснована концепция стадийности процессов прессования металлических порошков в присутствии жидкой фазы.

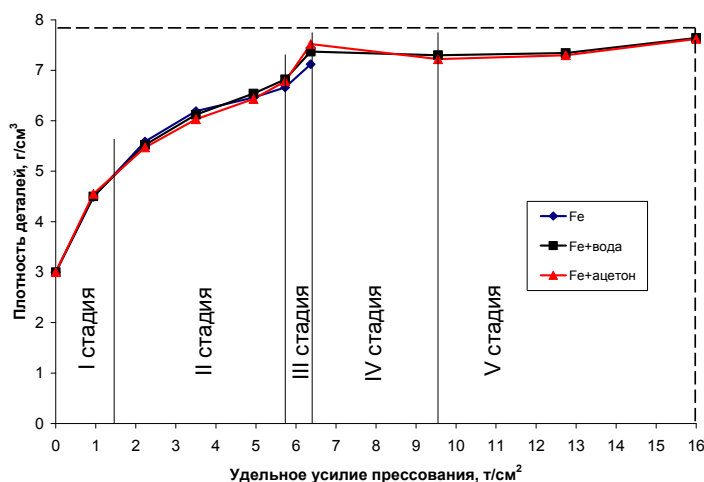


Рис. 2. Экспериментальные кривые уплотнения в присутствии жидкой фазы

Уплотнение сыпучей среды сопровождается двумя процессами: межчастичным смещением (структурной деформацией) и деформацией самих частиц с образованием и расширением зон контактов. Структурная деформация преобладает на начальной стадии уплотнения и может быть достаточно протяженной.

В работе [1] установлено, что если контактные напряжения превышают прочность контактных поверхностей, то происходит их частичное разрушение с образованием поровых каналов, соединяющих закрытые поры с тупиковой и внешней газовой средой (рис. 3б), что наглядно устанавливается на IV стадии уплотнения (рис. 2).

Были проведены металлографические исследования по изучению структурообразования на различных (1-5) стадиях уплотнения (рис. 3). Использован микроскоп «OLIMPUS» (программное обеспечение «SIAMS 700»), увеличением  $\times 100$ ;  $\times 200$ ;  $\times 400$ . Проводилась подготовка образцов:

а) травление четырехпроцентным раствором азотной кислоты (изучение межграницных контактов);

б) образцы после полирования (без травления) – использованы для установления общей пористости и траектории образования поровых кластеров.

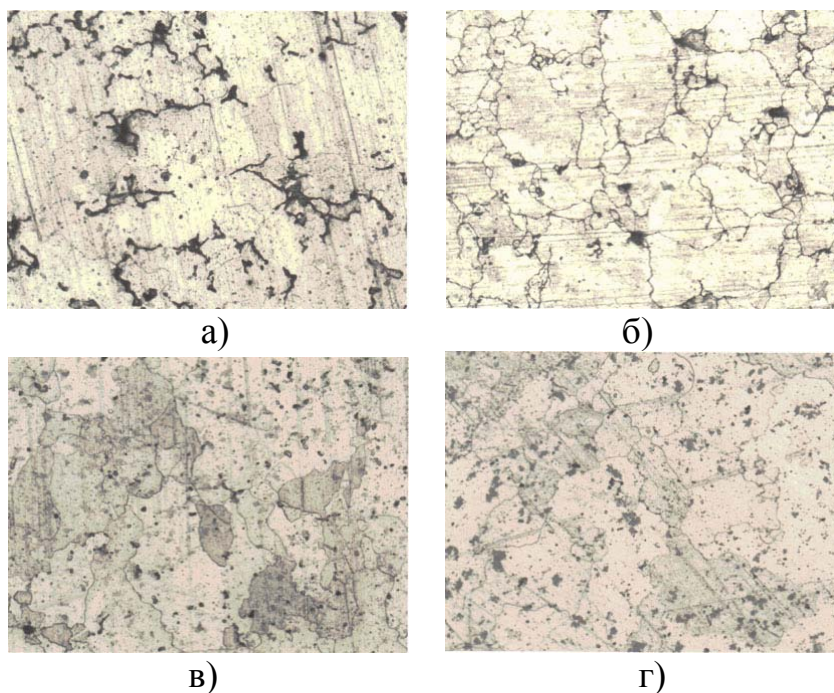


Рис. 3. Постадийное структурообразование при прессовании механических смесей: а – II стадия; б – III стадия; в – IV стадия; г – V стадия.

Установлено, что на IV, V стадиях (образцы группы «а») прессования наблюдается интенсивный рост зерен (объединенные в единый конгломерат соседних зерен за счет межкристаллитного сращивания). Данный эффект был отмечен профессором А.П.Гуляевым при изучении структуры деформируемых тел [2]. Им была предложена модель рассыпания (растворения) границ зерен, механизмом которого является двойникование.

Полное растворение границ приводит к объединению соседних зерен в один единый зеренный конгломерат.

Развитие сращивания происходит в результате синхронной с деформацией миграции границ одних контактирующих зерен за счет других [1].

Интенсивное межкристаллическое сращивание при прессовании механических смесей с использованием жидкой фазы установлено на IV, V стадиях прессования (рис. 3 в-г), причем завершение образования зеренных конгломератов наблюдается на V стадии, где моделируется регламент экструзии.

Таким образом, установлено явление межчастичного сращивания на завершающих стадиях прессования, что обуславливает существенное повышение уровня механических свойств отпрессованных заготовок и деталей.

В экспериментальных исследованиях было рассмотрено влияние свойств жидкости ( $\xi$ ), зазора ( $z$ ) и исходной влажности ( $w$ ) смеси на процесс консолидации порошковых материалов. В качестве параметров оптимизации были приняты: относительная плотность заготовок на 4-ой (P4) и 5-ой (P5) стадиях, а также температура жидкости ( $\Delta T$ ) вытесненной в зазор.

В соответствии с планом эксперимента  $N=2^3$  опыта с трехкратной воспроизводимостью каждой точки, статическая обработка полученных результатов проводилась при использовании стандартной программы регрессионного и дисперсионного анализа по методу наименьших квадратов.

Получена комплексная параметрическая модель в виде полиномов множественного порядка, определяющая влияние плотности, зазора и влажности на плотность 4-ой, 5-ой стадии прессования железосодержащих порошков.

**Таблица 1. Моделирование уплотнения на 4ой и 5ой стадии**

№ п/п	$\xi (x_1)$	$z (x_2)$	$w$ $(x_3)$	$p_4^{\text{отн}}$ $(y_1)$	$p_5^{\text{отн}}$ $(y_2)$	$\Delta T^{\text{отн}}$ $(y_3)$
1	(+) 0,127	(+) 0,025	(+) 0,2	0,915	0,969	0,4
2	(+) 0,127	(+) 0,025	(-) 0,1	0,902	0,968	0,3
3	(+) 0,127	(-) 0,005	(+) 0,2	0,895	0,961	0,2
4	(+) 0,127	(-) 0,005	(-) 0,1	0,895	0,958	0,2
5	(-) 0,099	(+) 0,025	(+) 0,2	0,928	0,973	0,5
6	(-) 0,099	(+) 0,025	(-) 0,1	0,909	0,968	0,3
7	(-) 0,099	(-) 0,005	(+) 0,2	0,902	0,965	0,2
8	(-) 0,099	(-) 0,005	(-) 0,1	0,895	0,958	0,2

$$Y_1=0.905179-0.241071x_1+0.8375x_2+0.0975x_3$$

$$Y_2=0.960321-0.071429x_1+0.45x_2+0.04x_3$$

$$Y_3=0.144643-0.892857x_1+8.75x_2+0.75x_3$$

На рисунках 4-9 представлена графическая интерпретация результатов экспериментов по изучению функциональных связей свойств и технологических характеристик изделий и процесса уплотнения.

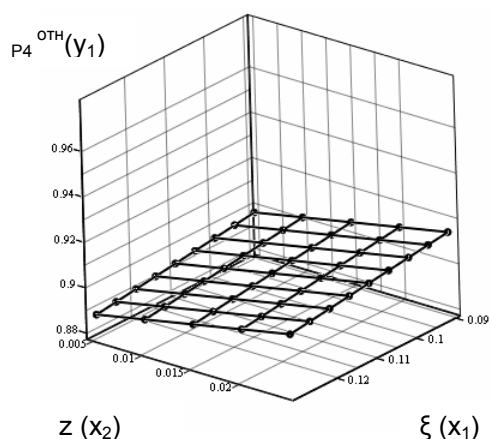


Рис. 4. Функциональная зависимость:  
 $p_4^{\text{отн}} = f(z, \xi)$  при  $w=10\%$ .

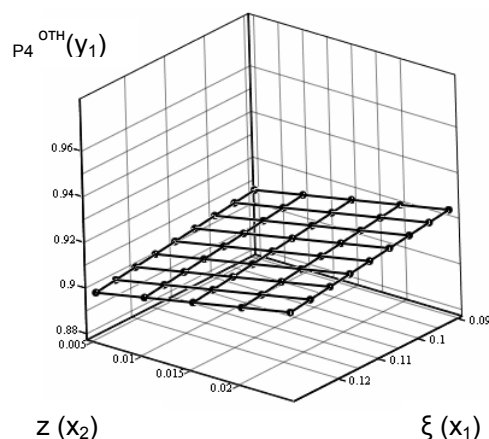


Рис. 5. Функциональная зависимость:  
 $p_4^{\text{отн}} = f(z, \xi)$  при  $w=20\%$ .

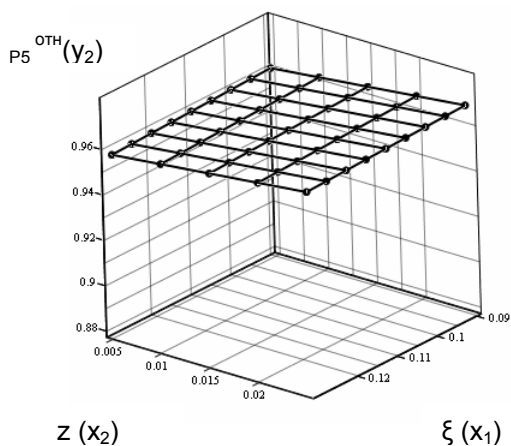


Рис. 6. Функциональная зависимость:  
 $p5^{OTN} = f(z, \xi)$  при  $w=10\%$ .

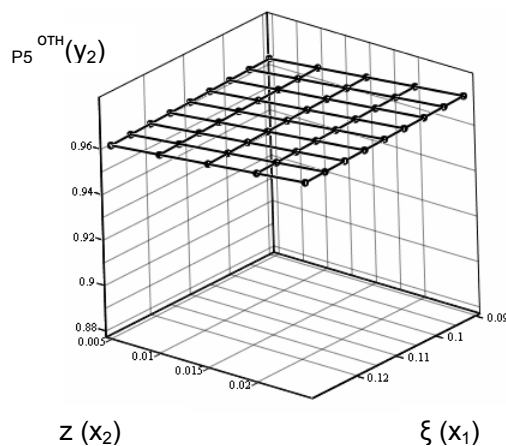


Рис. 7. Функциональная зависимость:  
 $p5^{OTN} = f(z, \xi)$  при  $w=20\%$ .

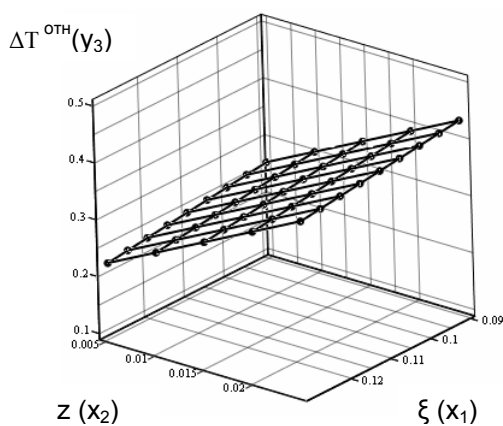


Рис. 8. Функциональная зависимость:  
 $\Delta T^{OTN} = f(z, \xi)$  при  $w=10\%$ .

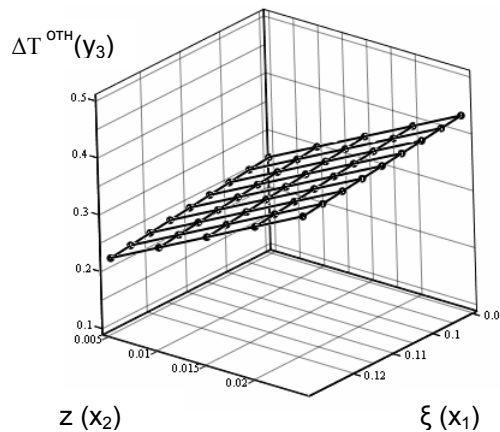


Рис. 9. Функциональная зависимость:  
 $\Delta T^{OTN} = f(z, \xi)$  при  $w=20\%$ .

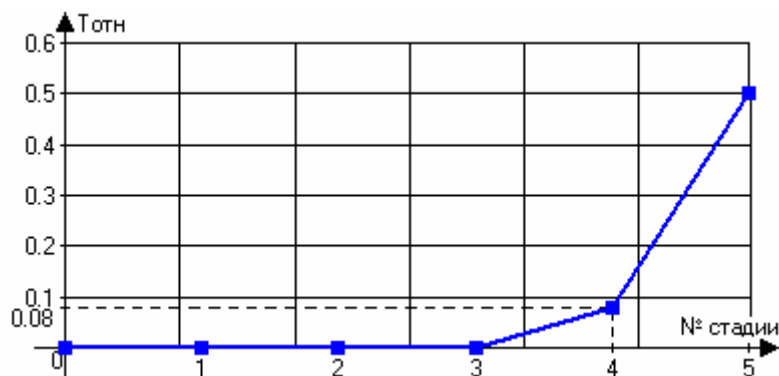


Рис. 10. Постадийный температурный градиент

Нахождение в механической порошковой смеси жидкости определяет вид субстанции (от сухой  $w=0$ , до увлажненной  $w=20\%$ ). В экспериментах был проведен анализ масспереноса влажной смеси ( $\Delta m$ ) в зазор ( $z$ ) в зависимости от величин  $z^{OTN}$  и  $w$ . Влияние зазора и влажности на массу транспортирующихся частиц в зазор представлено в таблице 2. и рис. 11.



**Таблица 2. Исследование масспереноса в процессе уплотнения**

№ п/п	$z^{отн}$ (x1)	w (x2)	$\Delta m^{отн}$ (y1)
1	(+) 0,05	(+) 0,2	0,540
2	(+) 0,05	(-) 0,1	0,505
3	(-) 0,005	(+) 0,2	0,059
4	(-) 0,005	(-) 0,1	0,054

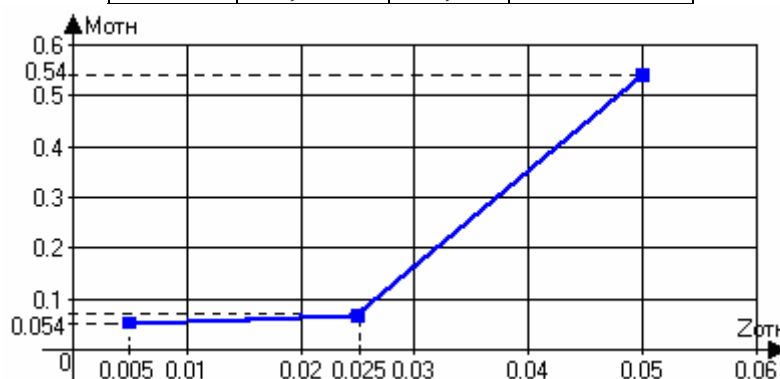


Рис. 11. Величина масспереноса в процессе уплотнения увлажненной смеси

Проведенные исследования позволяют существенно расширить эффективность процесса уплотнения порошковых материалов за счет рационального выбора влажности смеси, конструкции оснастки и транспортирующей жидкости.

### Литература

1. Дорофеев В.Ю., Егоров С.Н. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов. – М.: ЗАО Metallurgizdat, 2003. – 152 с.
2. Гуляев А.П. Моя металлография / А.П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка металлов, №7. 1995
3. Кокорин В.Н. К стадийности прессования двухкомпонентных смесей с различным агрегатным состоянием / В.Н. Кокорин, М.В. Кокорин // Вестник УлГТУ.– 2002. – №1. – С. 38 – 41.
4. Радомысельский И.Д. Некоторые особенности уплотнения порошков на разных стадиях прессования. / И.Д. Радомысельский, Н.И. Щербань // Порошковая металлургия.–1980.– №11.– С. 12 – 19.

УДК 621.73.06

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНИНЫ ТЯЖЕЛЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Долгополов Михаил Игоревич

Студент 6 курса

Кафедра «Оборудование и технологии обработки давлением»

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Складчиков Е. Н.

доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии обработки давлением»

### Введение

В ходе проектирования пресса для штамповки корпусов вагонных букс возникла задача проектирования станины пресса.

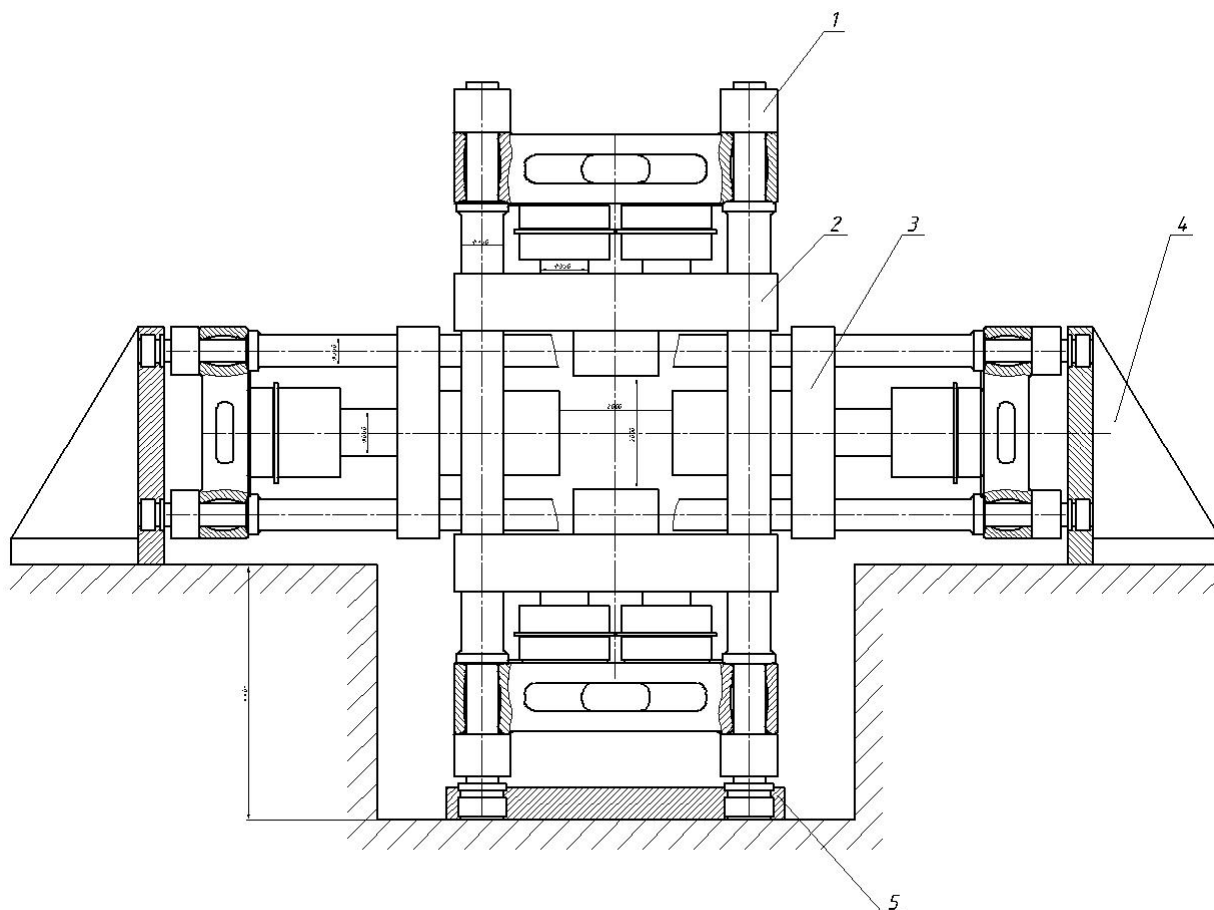


Рис. 1. Общий вид пресса

Пресс состоит из станины (1), подвижных поперечин (2, 3), оснований для крепления к фундаменту (4, 5). Станина колонного типа - состоит из

неподвижных поперечин, стянутых колоннами. К неподвижным поперечинам крепятся силовые и ускорительные цилиндры. Цилиндры крепятся с опорой на дно. Такое крепление позволяет не делать отверстий в поперечине, которые являются концентраторами напряжений. Так как на поперечину действуют изгибающие нагрузки, то напряжения распределяются неравномерно – металл в середине оказывается практически ненагруженным. Для снижения массы поперечины ее делают сложной формы, удаляя ненагруженный металл в середине.

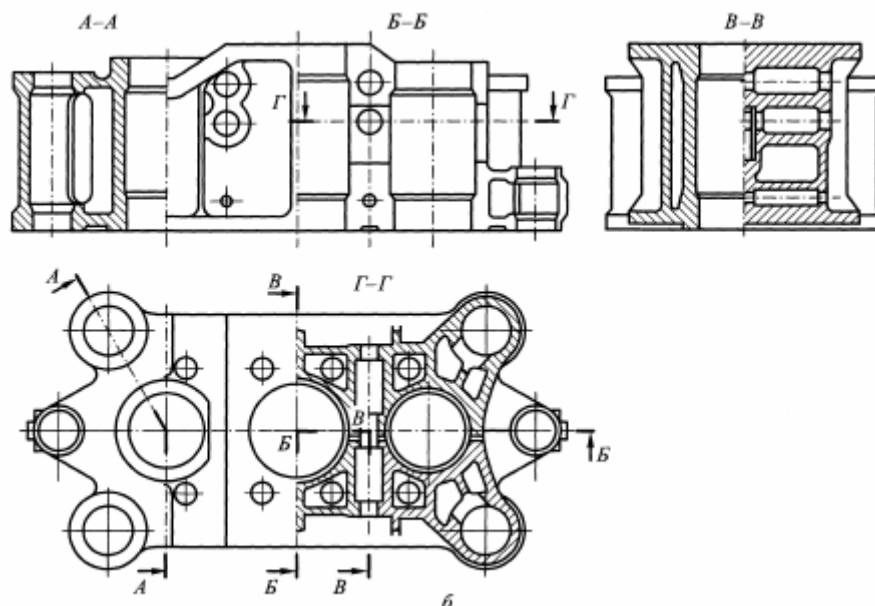


Рис. 2. Пример конструкции неподвижной поперечины из [1]

Целью данной работы является установление оптимальной формы поперечины, постепенно удаляя ненагруженный металл.

### Постановка задачи

В данной работе рассчитывается неподвижная поперечина вертикального ползуна. К этой поперечине крепятся 2 ускорительных цилиндра и 4 силовых диаметром 570 и 1500 мм соответственно. Рабочее давление в цилиндрах 32 МПа. Материал поперечины – Сталь 50Л. Допускаемые напряжения принимаем равным 165 МПа [2].

Расчет поперечины выполняется с помощью ПО ANSYS. Расчет с помощью метода конечных элементов позволяет получить полную картину распределения напряжений в детали и отследить все концентраторы напряжений.

Изначальная расчетная форма – параллелограмм с отверстиями под колонны. Изначально предполагалось использовать 8 колонн, при дальнейшем расчете было решено сократить число колонн до 4. Так как станина симметричная по 3 плоскостям, то рассчитывается 1/8 часть.

Высота исходного параллелограмма выбиралась из условия прочности на изгиб и составила 1300 мм. Масса – 199,3 т.

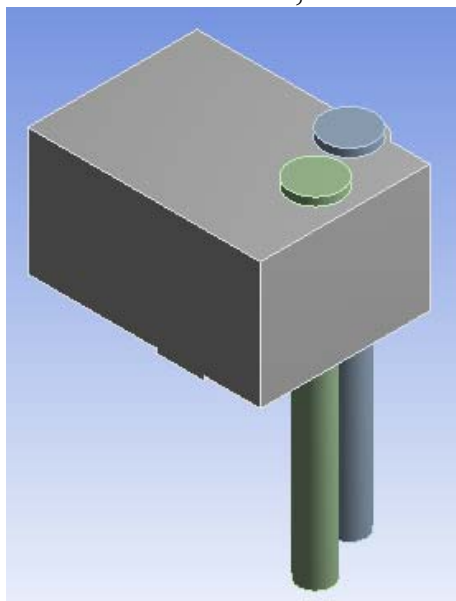


Рис. 3. Исходная геометрия

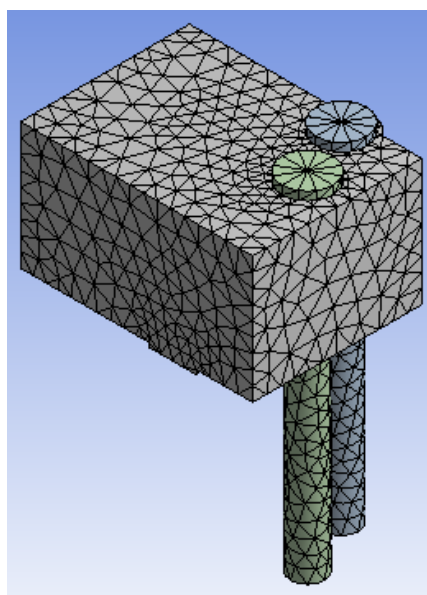


Рис. 4. Сетка конечных элементов

Внешние нагрузки: давление от цилиндров 32 МПа.  
Граничные условия: 3 плоскости симметрии.

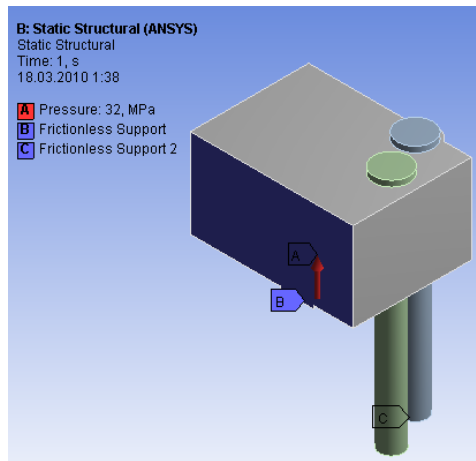


Рис. 5. Граничные условия

Результат расчета: эквивалентные напряжения по Мизесу.

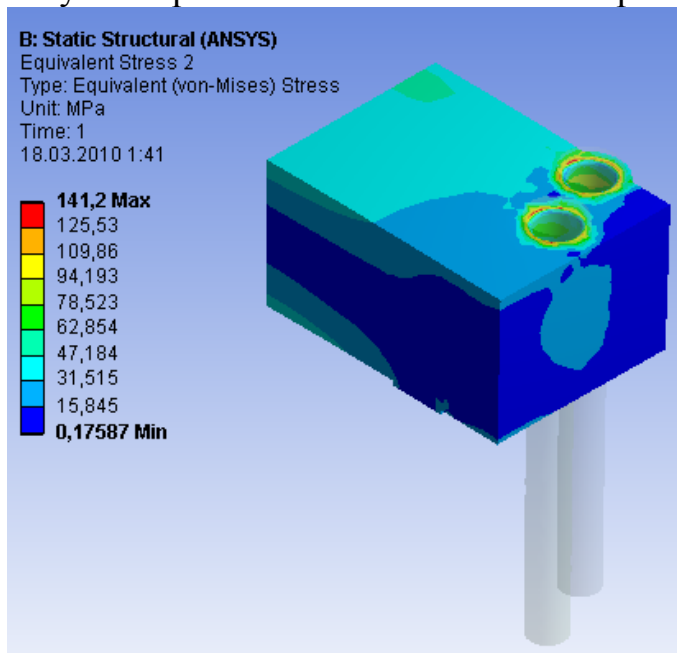


Рис. 6. Результат расчета

## Ход расчета

### 1. Масса 191,6 т.

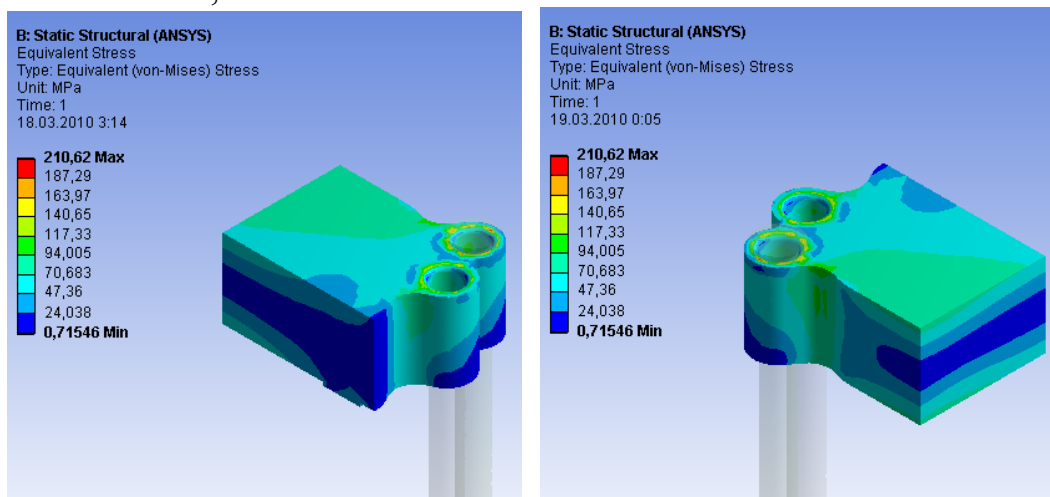


Рис. 7. 1 шаг расчета

## 2. Масса 136,8 т.

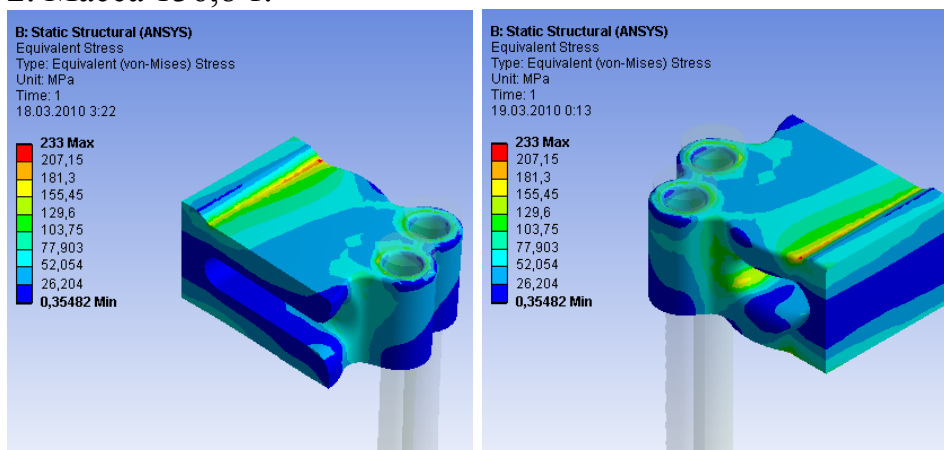


Рис. 8. 2-й шаг расчета

## 3. Масса 114 т.

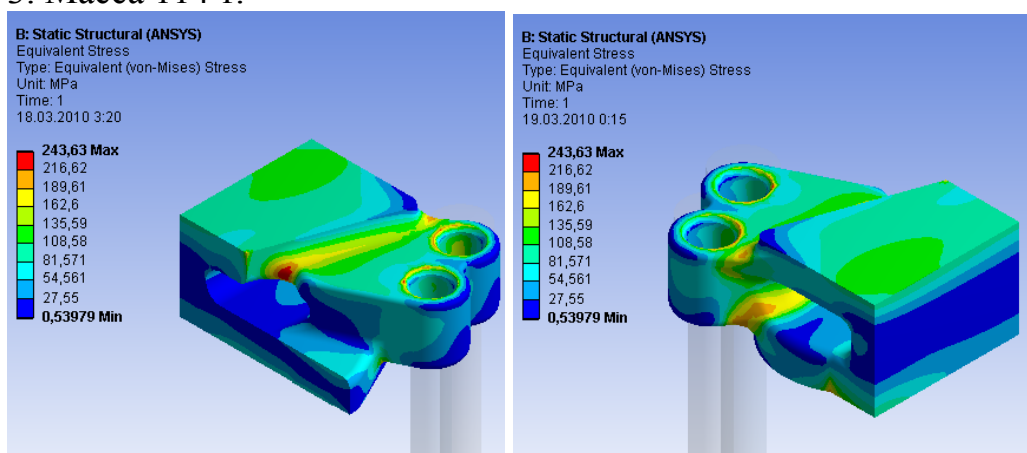


Рис. 9. 3 шаг расчета

4. Масса 112,8 т. На этом шаге было решено отказаться от использования 8 колонн в пользу 4.

Чересчур сложная форма дает множество концентраторов напряжений при небольших общих напряжениях, поэтому наилучшая форма – максимально простая.

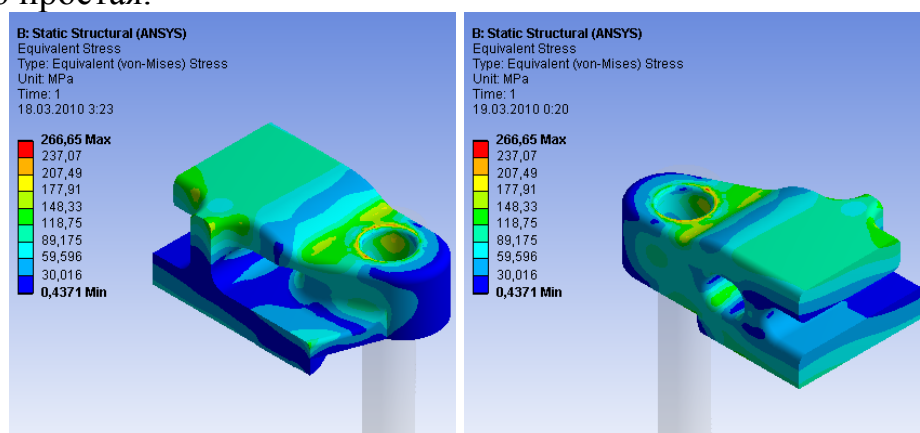


Рис. 10. 4 шаг расчета

## 5. Масса 103,5 т.

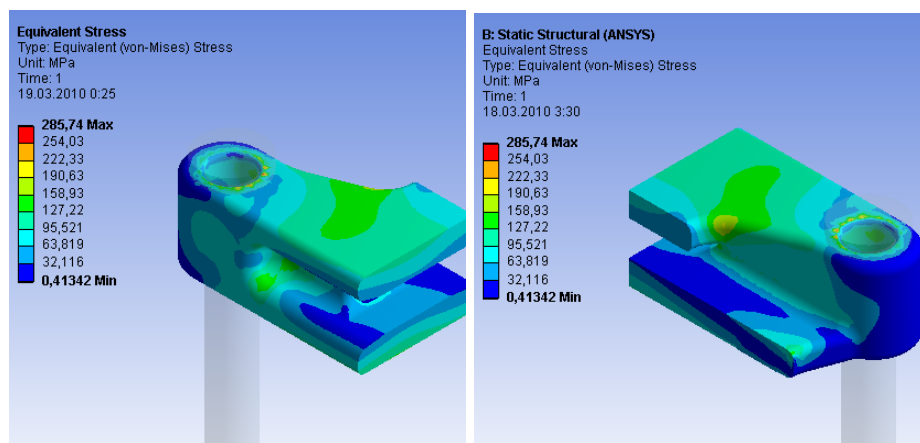


Рис. 11. 5 шаг расчета

### 6. Масса 99,9 т.

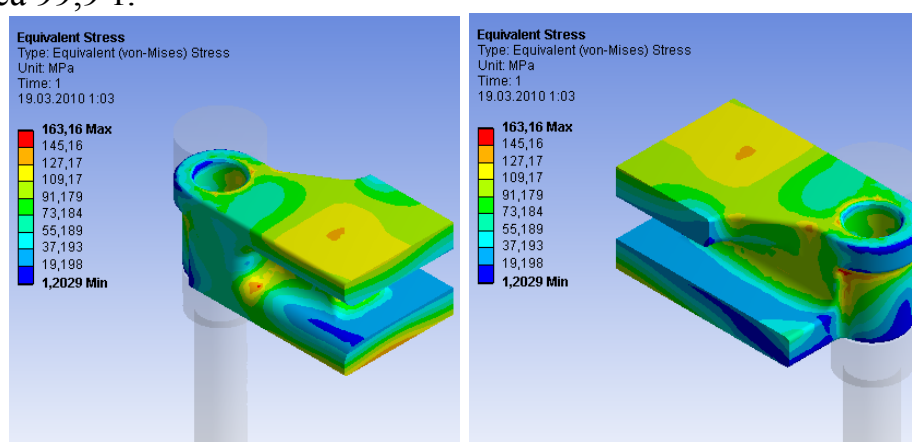


Рис. 12. 6 шаг расчета

Данную форму принимаем как окончательную, поскольку дальнейшее удаление металла приводит лишь к образованию новых концентраторов напряжений. Масса поперечины в результате расчета уменьшилась с 191,6 т до 99,9 т, т. е. на 49,9%.

Проведем расчет коэффициента запаса по допускаемой нагрузке.

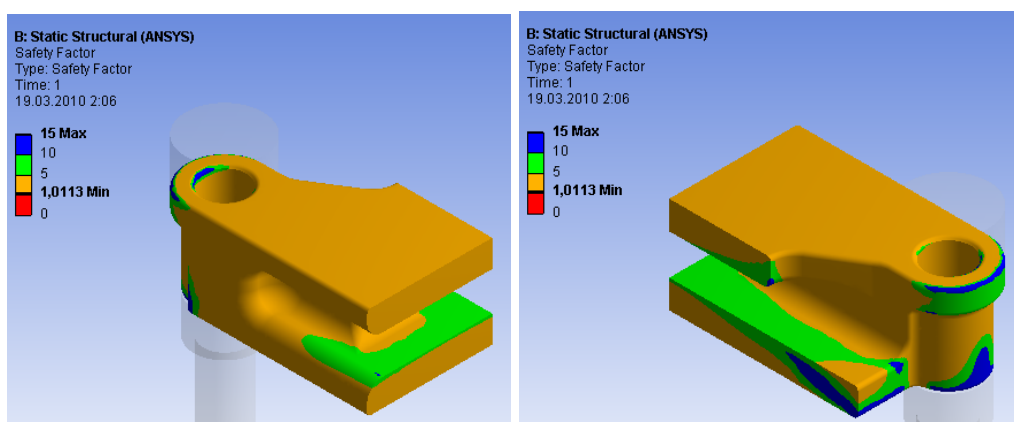


Рис. 13. Коэффициент запаса по допускаемой нагрузке

Как видно из расчета большая часть металла находится в нагруженном состоянии с напряжением от 33 до 163 МПа, что свидетельствует о рациональной форме поперечины.

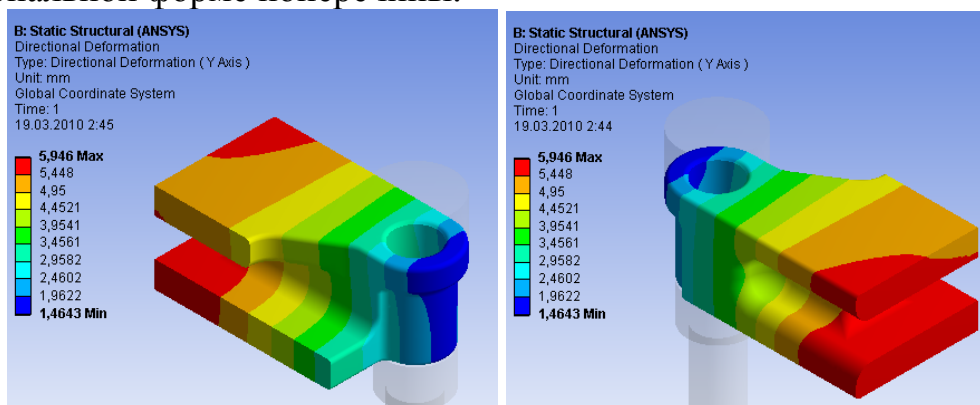


Рис. 14. Вертикальные деформации

## Выводы

С помощью современных методов расчета удалось определить оптимальную форму неподвижной поперечины пресса, значительно (почти в 2 раза) уменьшив ее вес. Метод конечных элементов обладает значительными преимуществами перед традиционными методами расчета, т. к. позволяет увидеть полную картину распределения напряжений в детали и точно оценить значения напряжений в концентраторах напряжений. Описанный метод может применяться не только при проектировании станины гидравлического пресса но и в других подобных задачах, когда необходимо определить оптимальную форму той или иной детали.

## Литература

1. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов / под ред. Л.И. Живова.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 560 с ил.
2. В.И. Ануриев. Справочник конструктора машиностроителя: В 3 т. Т.1-3. - М.: Машиностроение, 2001. - 864с.



УДК 621.735.016.3.001.573

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНЫХ РАСЧЕТАХ УСИЛИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Евграфова Ольга Дмитриевна

*Студентка 4 курса*

*Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»*

*Санкт-Петербургский институт Машиностроения*

*Научный руководитель: А.Ф. Фомичев,*

*к.т.н., доцент кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением»*

При внедрении новых технологических процессов ОМД все шире используются компьютерные программы, одной из которых является расчетный комплекс Simufact Forming [1]. Но при их использовании необходимо быть готовым, к тому, что полученный результат может содержать отклонения от истинных значений параметров. Получаемые погрешности закладываются допущениями, принимаемыми в математических моделях [2]. И пользователю программ важно оценить величину этих погрешностей особенно в том случае, когда по результатам расчета необходимо принять решение, например при выборе оборудования. Чтобы внести некоторую ясность в этот вопрос в Санкт-Петербургском институте Машиностроения были проведены компьютерные исследования с использованием указанного выше расчетного комплекса.

Известно, что одним из факторов, влияющих на усилие деформации, является контактное трение, которое учитывается при компьютерном расчете законом трения и величиной коэффициента (параметра) трения. Так же известно, что влияние контактного трения на усилие деформации в разных процессах ОМД различно, однако количественная оценка этого влияния пока не установлена. Чтобы ее установить, было проведено компьютерное моделирование различных процессов ОМД: кузнечной осадки и протяжки, облойной штамповки, прямого и обратного прессования. В качестве варьируемого параметра брались предельно допустимые значения коэффициента трения, равные 0,01 и 0,5. А чтобы исключить влияние тепловых процессов, температура заготовки принималась равной 20°C. В качестве критерия, оценивающего интенсивность влияния сил трения на усилие деформации, принимался разброс минимального и максимального значений усилия деформации. Получены следующие результаты: при осадке 5%, при протяжке 8%, при облойной штамповке 57%, при обратном прессовании 130%, а при прямом- 300%.

Из этого можно сделать вывод, что при моделировании процессов ОМД, в которых доля свободных поверхностей велика, неправильный выбор значения коэффициента трения не сильно повлияет на точность расчета усилия деформации. Но и в этом случае могут возникнуть затруднения, когда пользователь программы должен выбрать размер конечного элемента (объема). Так, например, при использовании программы Sf Forming, входящей в вышеуказанный расчетный комплекс, с увеличением размеров конечного объема возрастает и усилие деформации. Эти данные были получены при моделировании операции осадки. Т. е. нужно выбрать размер конечного объема оптимальный по соображениям точности расчета усилия деформации. Оптимальность же можно установить путем сравнения результатов расчета с результатами физического моделирования, которое можно воспроизвести в лабораторных условиях.

При моделировании же процессов ОМД, в которых доля свободных поверхностей не велика, или они совсем отсутствуют, как следует из выше приведенных данных, даже небольшая неточность в задании значений коэффициента трения может привести к существенным ошибкам расчета. Поэтому важно выбрать оптимальное значение коэффициента трения. В некоторых случаях его определяли экспериментально [3], проводя осадку цилиндрических образцов. Но, как показывает опыт использования расчетного комплекса Simufact Forming такой путь определения значения коэффициента трения не гарантирует получения точного значения усилия деформации.

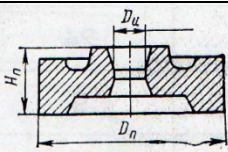
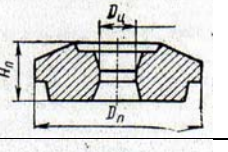
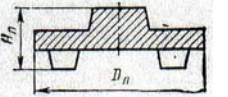
В качестве постановки вопроса можно предложить такой путь решения проблемы: для типовых поковок провести промышленный эксперимент по методике, описанной в источнике [4]. По результатам эксперимента отработать входные параметры компьютерного расчета и создать базу данных, которую можно использовать для последующих расчетов.

В качестве попытки реализовать высказанные соображения можно представить результаты расчетов, основой для которых были данные, приведенные в источнике [4]. Это результаты промышленных экспериментов, проведенных на Челябинском тракторном и Кузнечно-прессовом заводах. Были замерены усилия штамповки восемнадцати поковок, различных по размерам, степени сложности формы и маркам сталей. Все поковки - это тела вращения. Из них для расчета были оставлены четыре, для которых существовали аналоги сталей в библиотеке программы Sf Forming SFM. Поковки приведены в таблице 1. Разброс усилий штамповки авторы эксперимента объясняли изменениями производственного цикла, поэтому в качестве критерия достоверности использовали меньшие значения усилия. Далее приведены результаты компьютерных расчетов в такой последовательности: номер поковки, значение фактора трения, величина погрешности расчетного значения усилия по сравнению с экспериментальным.

- 1: 0,3; +15%
- 2: 0,5; +17%
- 3: 0,3; +6,4%
- 4: 0,3; +1,3%

Предварительно можно сделать вывод, что форма поковки и марка материала влияют на величину фактора трения. Окончательный вывод можно будет сделать после продолжения исследований.

**Таблица 1.**

Типы поковок	Сталь	Размеры поковок в мм					Температура штамповки в °С	Усилия штамповки в тс
		$D_n$	$H_n$	$D_{ц}$	$D_1$	$H_1$		
	35	22 8	45	12 0	27 5	4,4±0, 2	1100- 1250	1760- 2070
	45	83	33	28	10 3	2,0±0, 1	1100- 1200	350- 360
	20	10	86,	-	12	3,1±0, 1	1000- 1100	475- 540
		2	5 70			6		3,0±0, 1

На этих же поковках было проверено влияние размера конечного элемента (КЭ) на величину усилия. В расчет вводились размеры КЭ с длиной ребра 1,5; 2,8; 4 мм. Отклонения в результатах расчета отмечено не было.

**Вывод:** при расчете усилия штамповки необходимо корректно выбирать значение коэффициента ( параметра ) трения ,так как его значение может существенно сказывается на точности расчета.

### Литература

1. *Фомичев А.Ф. и др.* Компьютерное моделирование процесса штамповки заготовок турбинных лопаток из жаропрочного сплава ХН65ВНТЮ// КШП. ОМД, 2008 №7 с. 40- 43.
2. *Степанский Л.Г.* Об опытной проверке результатов компьютерного моделирования процессов пластического деформирования//КШП. ОМД, 2001. №6. с. 30-35.
3. *Петров П.А.* Исследование трения при холодной деформации сплава АМц//КШП. ОМД., 2005.,№6,с. 20- 22.
4. *Даммер А.Э., Кононов В.Г., Гаврилов Ю.И.* Экспериментальное определение технологических усилий штамповки поковок на кривошипных прессах// Кузнечно-штамповочное производство, 1975., №2.,с. 9-11.

УДК 621.98

## РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ № 2360-5413014/015 «КРЫШКА ЛЮКА НАЛИВНОЙ ГОРЛОВИНЫ ТОПЛИВНОГО БАКА»

Земскова Анастасия Николаевна

*Студентка 4 курса, кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»*

*Ульяновский государственный технический университет*

*Научный руководитель: В. Н. Кокорин,*

*кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и обработка металлов давлением»*

Анализ конструкции детали ФП130-3716182 (рис.1) показывает, что она нетехнологична по многим показателям: требуется большое количество операций и, соответственно, технологической оснастки; низкий коэффициент использования металла; требуется использовать дорогостоящее технологическое оборудование - многопозиционный пресс и т.д.

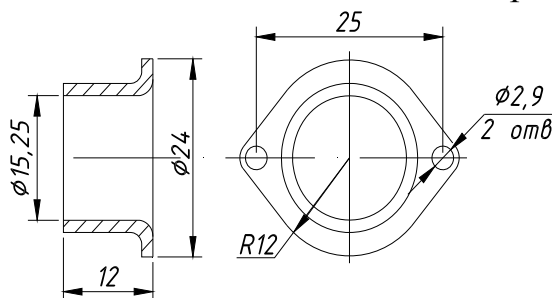


Рис.1. Эскиз детали ПФ130-3716182

Анализ действующего технологического процесса изготовления детали показывает, что изготовление детали осуществляется на многопозиционном прессе, что обеспечивает высокую производительность и низкую трудоемкость штамповки. Однако более тщательный анализ этой технологии позволяет сделать вывод, что здесь имеется ряд недостатков, одним из которых является низкий коэффициент использования металла.

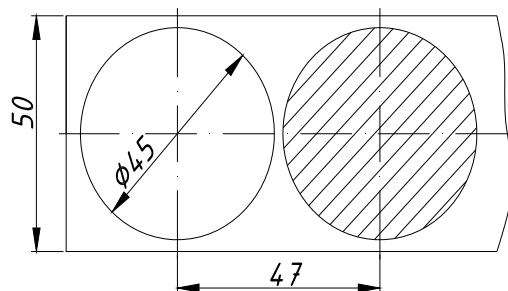


Рис.2. Действующий способ раскроя ленты на заготовки

Из рис. 2 видно, что для изготовления детали применяется заготовка круглой формы, которая вырубается по замкнутому контуру с перемычками. Сравнивая форму фланца детали и форму заготовки, приходим к выводу, что здесь может быть использована более рациональная форма. Изучение переходов штамповки, конструкций технологической оснастки и применяемого технологического оборудования позволяет прийти к выводу о возможности использования новой формы заготовки.

Действующий способ раскроя предусматривает расход металла на одну деталь  $G = 12,913$  г.

Результаты анализа разработки металлосберегающего технологического процесса показывают, что для изготовления детали может быть использована круглая заготовка с лысками. Ее размеры и раскрой показаны на рис.3.

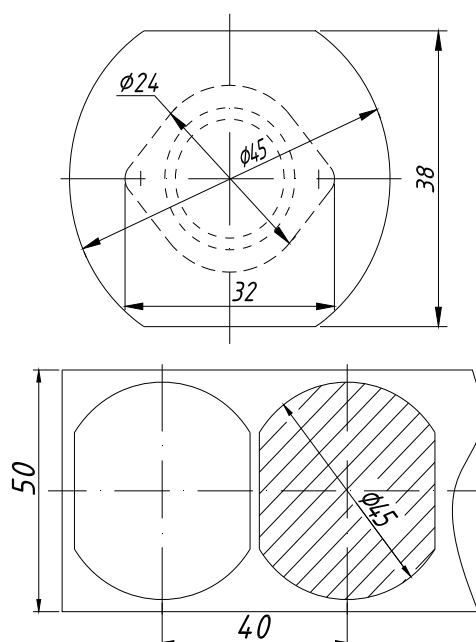


Рис.3. Рациональная форма заготовки и раскроя ленты

Предлагаемый раскрой ленты на заготовки уменьшает расход металла, но при этом при выполнении вытяжных операций следует изменить геометрические размеры рабочих частей штампов для 1-й и 2-й вытяжки. Это связано с тем, что для этих операций должны быть уменьшены коэффициенты вытяжки  $m_1$  и  $m_2$  примерно на 10%. Анализ показывает, что такое изменение не приведет к ухудшению качества штамповки и увеличению числа операций.

Данная форма заготовки предусматривает расход металла на одну деталь в количестве  $G_1=10,99$  г.

Снижение расхода металла по сравнению с действующим технологическим процессом составляет  $DG_1=1,923$ г.

Применение данной формы заготовки не требует больших деталей - необходима переделка рабочих частей вырубного и двух вытяжных штампов. Ширина исходного материала штампа без изменения.

Подробный анализ разработки металлосберегающего и высокопроизводительного технологического процесса штамповки, применяемого на заводе технологического оборудования, позволяет сделать вывод о возможности одновременной штамповки 2-х деталей на каждой позиции прессы - это обеспечивает повышение производительности оборудования в 2 раза и снижение трудоемкости изготовления деталей. Для этой цели необходимо разработать оптимальную форму заготовки, обеспечивающей одновременную штамповку двух деталей (рис.4).

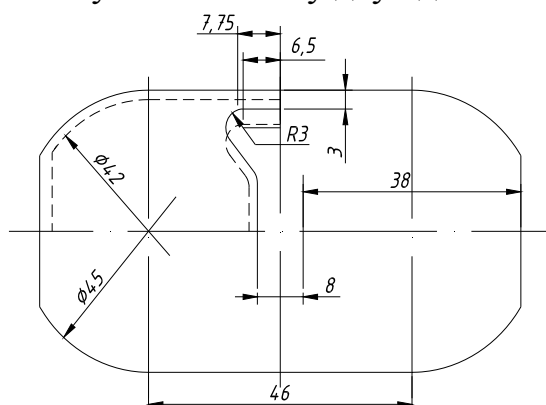


Рис.4. Заготовка для штамповки двух деталей

Анализ формы заготовки показывает, что на первой позиции прессы должна быть выполнена одновременно с вытяжкой 2-х деталей и вырезка перемычки между заготовками, ширина которой определяется расчетным путем. Из рис.5 видно, что после вытяжки размеры заготовки уменьшаются, при этом боковые перемычки заготовки подвергаются деформации удлинения. Изучение деформации плоских заготовок показывает, что максимальное удлинение перемычек не должна превышать 25%.

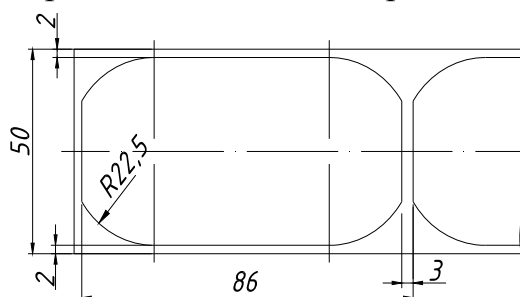


Рис.5. Раскрой заготовки для двух деталей

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{7,75 - 6,5}{6,5} \cdot 100\% = 19,23\%$$

Где  $\delta$  - относительное изменение перемычки, %;

$l_k$  - длина отдельного участка после деформации, мм;

$l_0$  - первоначальная длина отдельного участка перемычки, мм.

Для такой степени деформации необходимо иметь ширину перемычки между заготовками  $\sim 0,8$  мм. Необходимость боковых перемычек объясняется тем, что в процессе передачи деталей с позиции на позицию необходима жесткость заготовки, вызванная работой захватов грейферных линеек.

Представленная форма заготовок и показанный на рис.5 способ раскроя ленты направлены на снижение расхода металла и повышение производительности оборудования. При данном технологическом процессе расход металла составляет  $G_2=11,8$ г.

Снижение расхода металла по сравнению с действующим техпроцессом составляет  $DG_2=1,093$ г., т.е. на 8,5%.

На рис.6 представлена принципиальная схема штампа совмещенного действия, предназначенного для вырезки между заготовками и вытяжки одновременно двух деталей в штампе. Основные детали штампа: направляемая колонка 1, матрицедержатель 2, матрица 3, съемник 4, пуансон пробивной 5, штампуемая деталь, нижняя плита штампа 7, прижим-съемник 8, шпильки маркетного устройства 9, матрица пробивная 10 и пуансон 11.

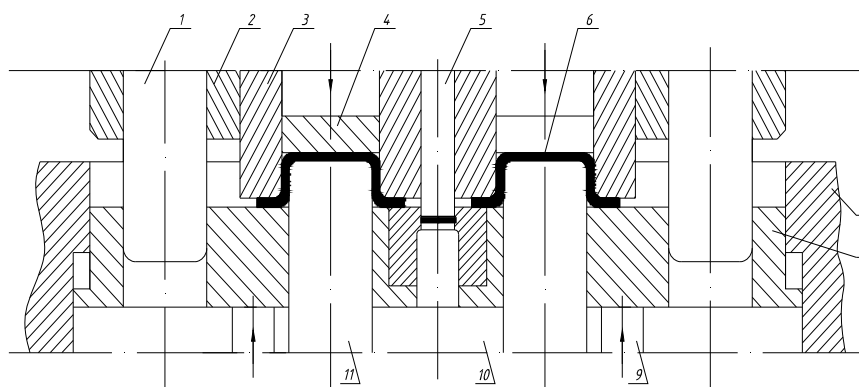


Рис.6 Штамп совмещенного действия для изготовления двух деталей (продольный разрез)

Принцип работы штампа заключается в следующем: при опускании верхней половины штампа сначала производится прижим заготовки к зеркалу матрицы, при этом сначала пробивка перемычки между заготовками, затем вытяжка одновременно двух деталей.

Особенности конструкции штампа: до пробивки перемычки, между заготовками направляемые колонки 1 должны входить в отверстие прижима-съемника 8; усилие прижима в 1,5 – 2 раза должны быть больше усилия вырезки перемычки между заготовками и пробивной пуансон 5 выступает за пределы вытяжной матрицы не больше 1,5 толщины материала заготовки.

Применение данного технологического процесса штамповки предусматривает применение ленточного материала, применяемого согласно действующей технологии. Внедрение этого мероприятия требует изготовление новых штампов применение многопозиционного прессы усилием 0,63 МН.

Разработка нового технологического прессы штамповки детали. Анализ рассмотренных выше вариантов технологических процессов показывает, что

первый вариант обеспечивает значительное повышение коэффициента использования металла, а производительность труда остается на прежнем уровне, второй вариант позволяет повысить производительность прессового оборудования почти в 2 раза, а норма расхода металла возрастает. Это привело к созданию совершенно новой формы заготовки для штамповки двух деталей одновременно, исключающей недостатки первых двух вариантов. На рис.7 представлена новая форма заготовки.

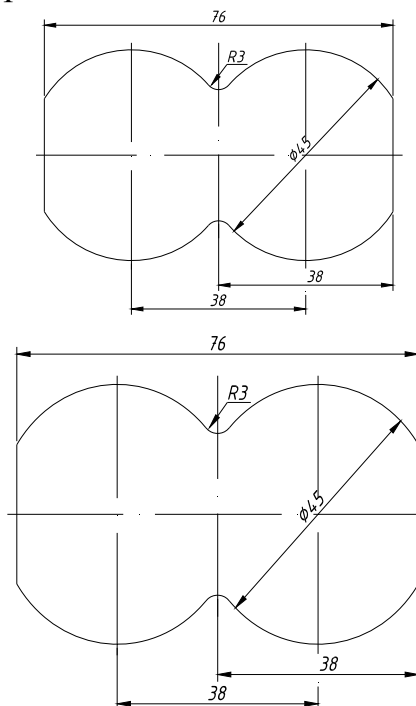


Рис.7 Заготовка и рациональная схема раскроя

Из рисунка 7 видно, что заготовка не имеет перемычек как боковых, так и между заготовками для каждой детали в отдельности. В процессе изготовления детали, заготовка разрезается на две отдельные заготовки и в дальнейшем штамповка ведется как при обычной штамповке.

Разработанный способ раскроя ленты на заготовки позволяет снизить расход металла на деталь. При данном варианте норма расхода металла на одну деталь составляет 10,33 г.

Снижение расхода металла составляет 20% по сравнению с действующим технологическим процессом.

На рис.8 представлена принципиальная схема конструкции штампа совмещенного действия для резки заготовки и вытяжки двух деталей в одном штампе.



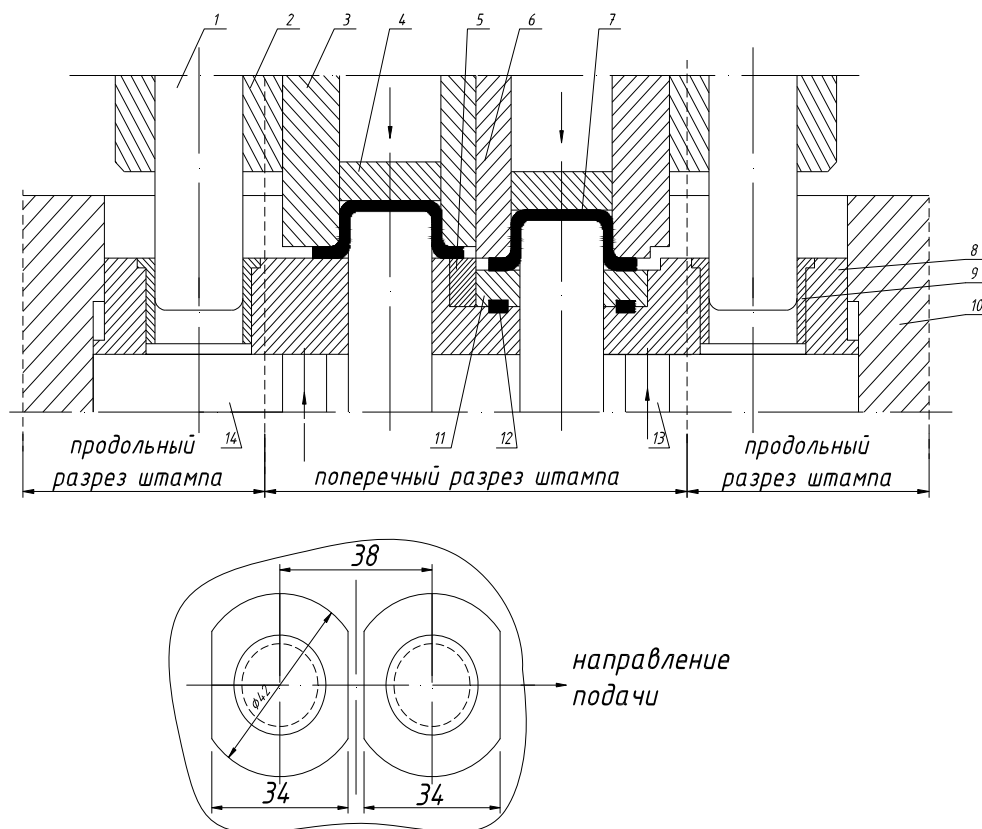


Рис.8 Штамп совмещенного действия для штамповки двух деталей

Основные детали штампа: направляющая колонка 1, матрицедержатель 2, матрица 3, съемник 4, нож 5, пуансон- матрица 6, штамповальная деталь 7, прижим – съемник 8, направляющая втулка 9, нижняя плита штампа 10, промежуточный прижим 11, резиновая прокладка 12, шпилька маркетного устройства 13 и пуансон 14.

Особенности конструкции штампа: имеется промежуточный прижим 11, величина хода которого составляет 1,5 толщины материала; усилие прижима 8 превышает усилия резки заготовки в 1,5 – 2 раза, до начала разрезки заготовки направляющая колонка 1 входит в направляющую втулку 9 и тем самым центрирует пуансон – матрицу 6 и нож 5; второй вытяжной пуансон на 1,5S (S- толщина материала заготовки) ниже, чем пуансон 13.

Эффективность предлагаемых технологических процессов. В табл.1 приведены показатели эффективности использования различных вариантов технологических процессов изготовления детали ПФ 130-3716182 (патрон), направленных на снижение расхода металла, повышение производительности труда и снижение трудоемкости изготовления при сохранении высокого качества штамповки.

**Таблица 1. Эффективность использования разработанных технологических процессов изготовления детали ПФ 130-3716182**

№ п/п	Разработанные варианты тех. процессов	Показатели эффективности						примечание
		Приме няемы й матери ал	Норма расхода металла		Снижение расхода металла			
			на 1 деталь, г	на 1 млн.дета лей,кг	на 1 деталь, г	на 1 млн.дета лей, кг	в %	
1	Действующий техпроцесс	Лента 0,7×50	12,913	12913,3	-	-	-	-
2	Техпроцесс с использованием	Лента 0,7×50	10,990	10990,0	1,923	1923,0	14,89	Снижение расхода металла на 14,9%
3	Техпроцесс с использованием заготовки с перемычкой и одновременной штамповкой двух деталей	Лента 0,7×50	11,814	11814,0	1,099	1099,0	8,51	Снижение расхода металла на 8,5%; повышение производительности в 2 раза
4	Техпроцесс с использованием заготовок без перемычек и одновременной штамповки двух деталей	Лента 0,7×80	10,330	11330,0	2,583	2583,0	20,0	Снижение расхода металла на 20% и повышение производительности
		Лента 0,7×90	11,622	11622,0	1,291	1291,0	9,99	Снижение расхода металла на 10%; повышение производительности в 2 раза

## Выводы

На основании анализа вариантов разработанных технологических процессов изготовления детали ПФ 130-3716182 (Патрон) можно сделать следующие выводы:

1) наиболее рациональным технологическим процессом является способ изготовления одновременно двух деталей из цельной заготовки, которая разрезается на две части на первой позиции прессы. Этот вариант обеспечивает снижение расхода металла на 20% с одновременным повышением производительности прессового оборудования в 2 раза;

2) внедрение рационального технологического процесса требует изготовления новых штампов, обеспечивающих одновременное изготовление двух деталей на каждой позиции прессы;

3) рекомендуется для изготовления детали по новому технологическому процессу использовать многопозиционный пресс усилием 0,63 МН;

4) особенности разработанной прогрессивной технологии могут быть использованы и при изготовлении других массовых деталей.

УДК 621.777; 621.791.44

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРШНЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ.**

Смирнов Дмитрий Павлович<sup>(1)</sup>, Исамутдинова Кристина Руслановна<sup>(2)</sup>

*Аспирант 2 года обучения (очная форма)<sup>(1)</sup>, студент 4 курса<sup>(2)</sup>*

*Кафедра «Обработка материалов давлением»*

*ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева»*

*Научный руководитель: Первов М. Л.*

*Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением»*

Поршень – в тепловой машине – деталь, предназначенная для циклического восприятия давления расширяющихся газов и преобразования его в поступательное механическое движение, воспринимаемое далее кривошипно-шатунным механизмом.

Поршень – одна из важнейших деталей двигателя внутреннего сгорания. Он передает энергию сгорания топлива через палец и шатун коленчатому валу.

Во время работы на поршень действуют высокие механические и тепловые нагрузки. Максимальное давление в цилиндре, возникающее при сгорании топливно-воздушной смеси, может достигать 65 – 80 бар в бензиновом двигателе и 80 – 160 бар в дизеле.

Во время работы поршень совершает возвратно-поступательное движение, периодически ускоряясь до скорости более 100 км / час, а затем замедляясь до нуля. Такой цикл происходит с удвоенной частотой вращения коленчатого вала, то есть при 6000 оборотов в минуту цикл «ускорение – замедление» происходит с частотой 200 Гц. Максимальная величина ускорений, приходящаяся на верхнюю и нижнюю мертвые точки, может достигать 15000 – 20000 м / с<sup>2</sup>, что соответствует перегрузке (1500 – 2000) g. От действия ускорений возникают инерционные силы по величине соизмеримые с теми, что действуют от давления при сгорании.

Сгорание топливовоздушной смеси происходит при температуре 1800–2600 °С. Эта температура значительно превышает температуру плавления поршневого сплава на основе алюминия (~700°С). Чтобы не расплавиться, поршень должен эффективно охлаждаться, передавая тепло от камеры сгорания через кольца, юбку, стенки цилиндра, палец и внутреннюю поверхность охлаждающей жидкости и масла. При нагревании поршня происходит снижение предела прочности материала, возникают термические

напряжения от перепадов температуры по его телу, которые накладываются на напряжения от сил давления газов и инерционных сил.

Таким образом, условия работы поршня можно определить как очень сложные.

Поршень подразделяется на три части, выполняющие различные функции: днище, уплотняющая часть и направляющая часть (юбка).

Днище и уплотняющая часть образуют головку поршня. В уплотняющей части поршня располагаются компрессионные и маслосъемные кольца. В некоторых конструкциях поршней из алюминиевых сплавов в его головку залит ободок из коррозионностойкого чугуна (нирезиста), в котором прорезана канавка для верхнего наиболее нагруженного компрессионного кольца. Нирезистовую вставку под верхнее поршневое кольцо имеют, в частности, поршни двигателей, выпускаемых ТМЗ (Тутаевский моторный завод). Благодаря этому значительно увеличивается износостойкость поршня. Кольцевые каналы для маслосъемных колец выполняются со сквозными отверстиями, через которые масло, снятое с зеркала цилиндра, поступает внутрь поршня и стекает в поддон картера двигателя.

Юбка поршня (тронк) является его направляющей частью при движении в цилиндре и имеет два прилива (бобышки) для установки поршневого пальца. Так как масса поршня у приливов оказывается большей, чем в других частях юбки, температурные деформации при нагреве в плоскости бобышек также будут наибольшими. Для снижения температурных напряжений поршня с двух сторон, где расположены бобышки, с поверхности юбки, удаляют металл на глубину 0,5-1,5 мм. Эти углубления, улучшающие смазывание поршня в цилиндре и препятствующие образованию задиров от температурных деформаций, называются "холодильниками".

При комнатной температуре юбки поршней должны иметь овально бочкообразную форму. Дело в том, что при разогреве двигателя до рабочих режимов поршень расширяется неравномерно (сильнее в области бобышек), поэтому из овального он становится круглым. Бочкообразная же форма нужна ему для создания масляного клина в месте контакта с гильзой цилиндра.

Подробности, связанные с конструктивными элементами поршней, позволят глубже понять сложность задач, стоящих перед производителями.

Головка поршня – это его верхняя часть, которая включает днище и зону канавок под поршневые кольца. На днище поршня действуют давление газов и тепло от сгорания топлива, поэтому его головка должна:

- обеспечивать хорошее смесеобразование и полноту сгорания топлива;
- сохранять прочность при высокой температуре;
- обеспечивать отвод тепла от днища;
- передавать усилие на поршневой палец и шатун через бобышки;
- обеспечивать заданный ресурс по износу канавок под поршневые кольца.

Для упрочнения головка алюминиевых поршней может быть анодирована (нанесено защитное окисное покрытие). В дизельных двигателях камера сгорания может быть упрочнена путем армирования металлокерамическим волокном в процессе литья под давлением.

Как известно, в большинстве двигателей внутреннего сгорания серийных автомобилей устанавливаются литые алюминиевые поршни. Они вполне удовлетворяют всем требованиям и выполняют свою работу на достаточно высоком уровне, однако, такие поршни имеют и принципиально неустранимые недостатки, среди которых высокая пористость материала, низкая устойчивость к ударным и тепловым нагрузкам, и, как следствие, недолговечность службы поршня.

Более дорогие кованные поршни (иногда называемые штампованными) имеют перед литыми ряд неоспоримых преимуществ: стойкость к тепловым и ударным нагрузкам, твердость, долговечность, надежность. Они устанавливаются, в основном, на спортивные двигатели, подвергающиеся высоким перегрузкам в процессе своей эксплуатации. Такие поршни служат в 4–5 раз дольше литых. Однако у них есть свой недостаток – сложность их изготовления и цена. Далеко не каждый специализированный завод может изготавливать действительно качественные кованные поршни для силовых агрегатов. Это связано не только с наличием высокоточного профессионального оборудования. Необходимо также иметь глубокие познания в области материаловедения и машиностроения.

В мире существует несколько технологий изготовления поршней для двигателей внутреннего сгорания. Наиболее распространенная из них – это литье в специальную металлическую форму (кокиль). Ее основной недостаток – высокая пористость материала получаемого изделия, связанная с выходом газов при остывании расплава металла. Это самый дешевый и наиболее приемлемый для крупносерийного производства метод. Существует и более дорогой вариант – литье под давлением. Качество поршней здесь несколько выше, чем при обычном литье, а структура материала изменяется незначительно.

Еще одна технология, похожая на литье под давлением, называется жидкой штамповкой. Прессовка производится несколько позже, чем при литье под давлением. Материал подвергается штамповке на стадии кристаллизации, при остывании расплава, когда часть металла уже стала твердой. Давление устраняет микрополости, что улучшает структуру материала поршня, а значит и свойства изделия. Жидкая штамповка удобна тем, что позволяет «залить» различные вставки и металлические детали. Она легко обеспечивает соединение тела поршня с другими металлами, например, с нирезистовыми вставками под верхнее компрессионное кольцо. Такие поршни в основном используются для дизельных двигателей, они более долговечны, выдерживают большие нагрузки. Лазерным наплавлением наносят дополнительные покрытия, которые в основном применяют при изготовлении поршней для спортивных и тюнингованных моторов.

Естественно, массовое производство этого не требует: зачем делать поршень, который прослужит дольше самого автомобиля?

Альтернатива методам литья – изотермическая штамповка твердой заготовки. В этом процессе заготовку поршня получают не отливкой расплавленного металла в кокиль, а формовкой под давлением не расплавленной, но сильно нагретой, легко деформируемой заготовки. Такие поршни в основном используют для тюнинга за рубежом. К примеру, именно по этой дорогой технологии делает свои эксклюзивные поршни известная фирма Mahle. Для создания таких прогрессивных и наукоемких технологий важны не столько оборудование, сколько глубокие знания в области материаловедения для обеспечения требуемой структуры и в области технологии машиностроения для оптимального проектирования формы изделия, являющейся важным фактором качества работы изделия в тех или иных условиях. Специалистами Московского автомеханического института (Государственный технический университет МАМИ) под руководством профессора И. Л. Федоренко были разработаны технологии и оборудование для производства разнообразных типов поршней. Такие детали, полученные методом изотермической штамповки, применяют многие профессионалы и тюнинг-ателье, занимающиеся форсированием и доводкой двигателей, спортивными автомобилями и мотоциклами.

К материалам, применяемым для изготовления поршней двигателей (например, автотракторных), предъявляются следующие требования:

- высокая механическая прочность;
- малая плотность;
- хорошая теплопроводность;
- малый коэффициент линейного расширения;
- высокая коррозионная стойкость;
- хорошие антифрикционные свойства.

Для изготовления поршней применяются серые чугуны и алюминиевые сплавы. Поршни из чугуна прочны и износостойки. Благодаря небольшому коэффициенту линейного расширения они могут работать с относительно малыми зазорами, обеспечивая хорошее уплотнение цилиндра. Однако чугун имеет довольно большой удельный вес. В связи с этим область применения чугунных поршней ограничивается сравнительно тихоходными двигателями, в которых силы инерции возвратно движущихся масс не превосходят одной шестой от силы давления газов на днище поршня. Чугун имеет низкую теплопроводность, поэтому нагрев днища у чугунных поршней достигает 350 – 400 °С. Такой нагрев нежелателен особенно в карбюраторных двигателях, так как он служит причиной возникновения детонации.

подавляющее большинство автомобильных двигателей имеют алюминиевые поршни. Достоинства алюминиевых поршней: малая масса (как минимум на 30 % меньше по сравнению с чугунными); высокая теплопроводность (в 3 – 4 раза выше теплопроводности чугуна), обеспечивающая нагрев днища поршня не более 250 °С, что способствует

лучшему наполнению цилиндров и позволяет повысить степень сжатия в бензиновых двигателях; хорошие антифрикционные свойства.

Недостатками алюминиевых поршней являются: большой коэффициент линейного расширения (примерно в два раза больше, чем у чугуна), значительное снижение механической прочности при нагреве (повышение температуры до 300 °С приводит к снижению механической прочности алюминия на 50 – 55 % против 10 % у чугуна).

Исходным материалом служат алюминиевые сплавы с большим содержанием кремния АК12Д и АК18Д, для дизелей применяют гранулированный сплав 1379П. Первый из них, разработанный для моторов военного назначения, сейчас широко применяют в гражданских двигателях. В этом доэвтектическом, как говорят специалисты, сплаве кремний растворен в металле равномерно, что улучшает качество изделия.

Состав сплава сильно влияет на характеристики поршней, его подбор для разных типов двигателей – отдельная исследовательская задача. К сожалению, отечественная цветная металлургия не может сегодня обеспечить такого широкого выбора специальных сплавов, как хотелось бы специалистам. Однако из имеющихся сплавов методомковки удастся сделать поршни, твердость которых в полтора – два раза выше, чем литых.

Не будет преувеличением сказать, что поршень – наиболее ответственная и специфичная деталь в современном двигателе. Он должен быть легким и прочным, способным выдерживать значительные механические нагрузки и тепловые удары, и, кроме того, обладать высокой износостойкостью рабочих поверхностей, низким трением при минимально возможном зазоре в цилиндре. Последнее требование особенно важно для хорошей герметичности, возможности избежать прорыва газов из камеры сгорания в картер и поступления масла в обратном направлении. Иными словами - для минимального расхода масла с одновременным отсутствием шума (стука) поршня о стенки.

Недопустимые для нормальной работы двигателя зазоры между стенками цилиндров и алюминиевыми поршнями устраняются конструктивными мероприятиями, основными из которых являются: придание юбке поршня овальной или овально-конусной формы; изоляция тронковой (направляющей) части поршня от наиболее нагретой его части (головки); косой разрез юбки по всей длине, обеспечивающий пружинящие свойства стенок; Т- и П-образные прорезы в юбке поршня не на полную ее длину в сочетании с ее овальностью; компенсационные вставки, ограничивающие тепловое расширение юбки в плоскости качания шатуна.

Две основные проблемы, решаемые при проектировании моторов: как избежать повышенного износа поршня, как избежать прогара поршня. Обе эти проблемы возникают вследствие желания конструкторов максимально облегчить поршень, поскольку это позволяет улучшить показатели моторов и компрессоров.

Чтобы поршень противостоял этим воздействиям, он должен быть легким, прочным, износостойким, хорошо проводить тепло. Все



перечисленные условия должны быть учтены при проектировании. Форма внутренних поверхностей и конструктивных элементов поршня должна обеспечивать заданную прочность и работоспособность за счет рационального распределения и использования материала.

Особое внимание уделено форме наружной поверхности. Внешний профиль боковой поверхности поршня формируется с учетом деформаций от механических нагрузений (давления газов и инерционных сил) и теплового воздействия от сгорания топливовоздушной смеси таким образом, чтобы ни при каких условиях не произошло заклинивание в цилиндре, прорыв горячих газов в картер, прогорание камеры сгорания.

Температура поршня в зоне камеры сгорания (на днище) выше, чем на юбке, температурное расширение головки больше чем юбки, поэтому поршень в холодном состоянии – бочкообразный, с уменьшением диаметра от юбки к головке.

Сила давления газов, силы инерции и боковая сила деформируют поршень так, что юбка овализируется. Для компенсации этой деформации поршень изначально выполняется с «противоэллипсом», большая ось которого расположена в перпендикулярно оси пальцевого отверстия.

Зазоры между поршнем и цилиндром должны быть сведены к минимуму для предотвращения шума, особенно в холодном двигателе. Но они должны быть достаточными для предотвращения заклинивания при работе прогретого двигателя.

И это только часть проблем, которые приходится решать при конструировании и производстве поршней для конкретных двигателей. В целом получается, что поршень, как бы концентрирует технические новшества, заложенные в конструкцию мотора.

В данной работе особое внимание отведено проблеме получения такого поршня, который бы по вышеперечисленным параметрам имел максимально лучшие показатели.

Таким образом, целью данной работы можно указать следующее: исследование возможности получения современного поршня минимального веса, имеющего достаточную прочность, низкий коэффициент линейного расширения и обладающего достаточно высокими тепловыми (для увеличения мощности двигателя за счёт повышения температур в камере сгорания) и фрикционными (для снижения коэффициента трения для уменьшения износа юбковой части поршня и гильзы двигателя) показателями.

Разберем данные показатели и характеристики отдельно.

Несмотря на то, что алюминиевые поршни имеют существенно меньший вес по сравнению, например, с деталями из сталей, их вес является достаточно большим. Для уменьшения веса двигателя требуется использовать материалы с более низкой плотностью, однако при этом возникает проблема получения заданной прочности. Обе эти проблемы возможно решить при использовании в качестве исходного материала сплавы

на основе титана (для данной работы предполагается использование сплава ВТ6).

Кроме вышеозвученных преимуществ перед алюминиевыми у титановых сплавов есть ещё одна особенность – высокая жаростойкость и жаропрочность. Эти два показателя как нельзя лучше подходят для условий работы таких деталей как «Поршень», условия работы которых характеризуются как очень тяжелые. Титан в основе такого изделия позволит повысить ресурс детали, а значит и всей поршневой группы, включающей в себя поршень, поршневой палец и шатун.

Кроме того титановые сплавы имеют гораздо меньший коэффициент теплового расширения и практически не склонны, в отличие от алюминия, к анизотропии, что позволит намного упростить обработку внешней поверхности поршня.

Однако использование титановых сплавов имеет и свои недостатки, а именно – наряду с получением увеличенных основных прочностных показателей мы получаем ухудшение условий трения боковой поверхности поршня о гильзу. Неучет этого факта может привести к повышенному износу самой гильзы, что в свою очередь может привести в лучшем случае – к повышенному расходу масла, а в худшем – к заклиниванию поршня и поломке всего двигателя с последующим дорогостоящим ремонтом.

Вариантов решения данной проблемы может быть несколько. Самый простой выход из сложившейся ситуации – получить на боковой поверхности титанового поршня покрытие, нивелирующее это отрицательно сказывающееся в данном случае свойство титана. Напыление, наплавка и диффузионное создание покрытий в свою очередь тоже имеют ряд недостатков, главными из которых являются быстрый износ (вплоть до разрушения поверхностного слоя) и довольно длительный по времени процесс их нанесения для довольно глубокого проникновения в материал основного сплава.

С другой стороны – почему бы не попробовать получить довольно толстый плакирующий слой на поверхности поршня? В данной работе такой слой планируется получить запрессовкой титановой основы в трубную заготовку из алюминиевого сплава. Использование алюминиевых сплавов с повышенным содержанием кремния позволит сохранить достаточную прочность поверхностных слоев на юбке и уменьшить износ поршней по боковой поверхности. Кроме того использование таких сплавов никоим образом не снизит теплообмен между деталями поршневой группы и маслом, что очень важно в свете проблемы возможного перегрева и прогара поршня.

Использование подобной конструкции позволит существенно снизить вес поршня при сохранении (а возможно и увеличении) прочностных показателей и характеристик стойкости и надежности изделия.

Так почему же такая конструкция не используется до сих пор, если у нее столько положительных качеств? Ответ на этот вопрос кроется в сложности получения неразрывного соединения двух материалов с сильно

различающимися свойствами, ведь при температуре, при которой возможно деформирование титана алюминий уже начинает плавиться.

При разработке данной темы было спроектировано несколько примерных технологических процессов, реализация которых возможна для данных сплавов при определенных условиях изготовления изделия типа поршень.

Изначально авторы работы опирались на разработку японских конструкторов, которая была опубликована ещё в 80-х годах прошлого столетия. На рис. 1 представлена упрощенная схема процесса совместного выдавливания биметаллического поршня из двух сплавов на основе алюминия, причем сплавы в той работе имели примерно одинаковые прочностные характеристики. Кроме того, общая алюминиевая основа позволяла деформировать материал в нагретом состоянии, когда оба компонента изделия находились в схожем пластическом состоянии. К сожалению, о практическом использовании подобной технологии никакой информации найти не удалось.

Не смотря на то, что предложенная схема получает поршень, как бы состоящий из двух частей, граница которых (сама по себе являясь концентратором напряжения в конечном изделии) располагается в довольно неблагоприятном месте (а именно – в месте расположения отверстия под поршневой палец) со всеми вытекающими последствиями, данная японская разработка была осмыслена в рамках данной работы.

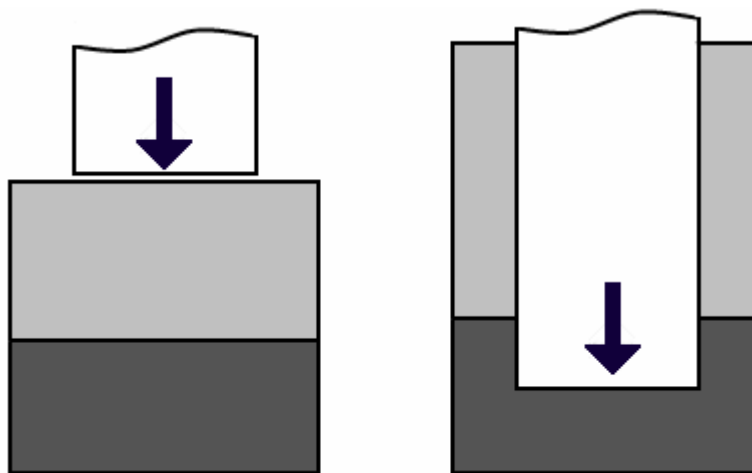


Рис. 1. Упрощенная схема «Японской технологии» производства биметаллического поршня

Однако попытки применить ее непосредственно к соединению титанового и алюминиевого сплавов натолкнулась на ряд проблем, решение которых либо существенно повысит трудоемкость процесса, сделав его недоступным даже для мелкосерийного производства, либо на настоящий момент технически не может быть реализовано.

Фактически же требуется получить границу материалов не поперек юбки, а вдоль.

Самое (на первый взгляд) простое решение – совместно выдавливать оба материала, чтобы получить заготовку, схематически изображённую на рис. 2.

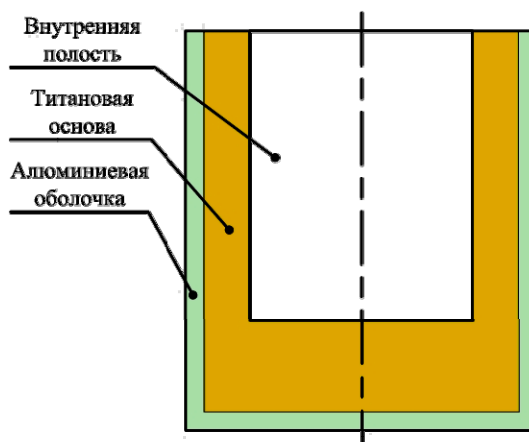


Рис. 2. Получение «равномерного» покрытия при помощи совместного выдавливания

Такая схема процесса не может быть использована по ряду причин:

– во-первых, возвращаемся к вопросу о температурном режиме деформации;

– во-вторых, существенно различающиеся характеристики материалов говорят о том, что деформироваться они будут тоже по-разному, что приведёт к практически полному выдавливанию сначала одного материала в свободную полость, а потом уже к деформации второго материала;

– в-третьих, если оболочка из алюминиевого сплава получится довольно тонкой на юбке (всей или какой-то ее части), то при механической обработке поверхности она либо будет удалена, либо получим выход основного материала на поверхность, что влечет за собой возможное расслоение по границе двух сплавов.

Проанализировав приведенную выше схему, было сделано одно немаловажное замечание – плакирующий слой нам необходим на юбке, а на приведенной схеме и днище получается закрыто алюминиевой оболочкой. Это отрицательно может сказаться при обработке камеры сгорания, кроме того следует учесть возможные дефекты на границе двух металлов.

Таким образом, наличие алюминиевого слоя на донной части поршня стоит считать недостатком предложенного варианта технологии. Логично было бы предложить вариант без донной части (рис. 2). Однако совместным выдавливанием такую деталь уже не получить. Плакирующий слой может быть получен либо обжимкой трубной заготовки на выдавленном титановом слое «поршня», либо запрессовкой титановой части изделия в трубную алюминиевую часть.

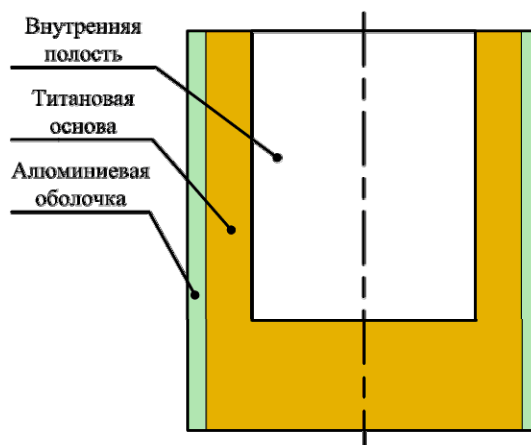


Рис. 2. Получение покрытия на боковой поверхности юбки при помощи трубной алюминиевой заготовки

Так как совершать обжим трубы более трудоёмкий процесс, чем запрессовка, то авторы данной работы остановились в настоящий момент на разработке оснастки для проведения экспериментов и теоретической обработке имеющегося материала с целью выработки математической модели, позволяющей оценить прочность получаемого соединения металлов. Опытный материал в ближайшем будущем должен подтвердить или опровергнуть данную теорию. В случае положительных результатов, авторами данной работы планируется исследовать различные условия для примерного технологического процесса с целью получить наиболее прочное соединение между материалами, которые в дальнейшем тоже могут варьироваться.

Примерный технологический процесс должен состоять из трёх основных этапов.

1) Раздельное получение титановой основы и алюминиевой оболочки (рис. 4) и обработка их соприкасающихся поверхностей для дальнейшего процесса изготовления изделия.

Раздельное получение заготовок позволяет использовать максимально удобные условия деформирования каждого материала, такие как оптимальная скорость нагрева заготовки, требуемая для данного материала температура обработки, скорость и усилие деформирования. Кроме того, раздельное получение составляющих частей позволит подготовить «свариваемые» поверхности, удалив с них излишнюю окисную пленку, очистив от окалины и придать требуемую шероховатость поверхностям. При этом «титановая» основа по наружной поверхности выполняется с небольшой конусностью (примерно  $1-3^\circ$ ). Это желательно выполнить как для облегчения извлечения выдавленной заготовки из матрицы (контейнера). Кроме того небольшой угол уже на этапе запрессовки в «алюминиевое» кольцо позволит предварительно продеформировать материал оболочки, разрушая его окисную плёнку и параллельно создавая контакт с материалом основы.

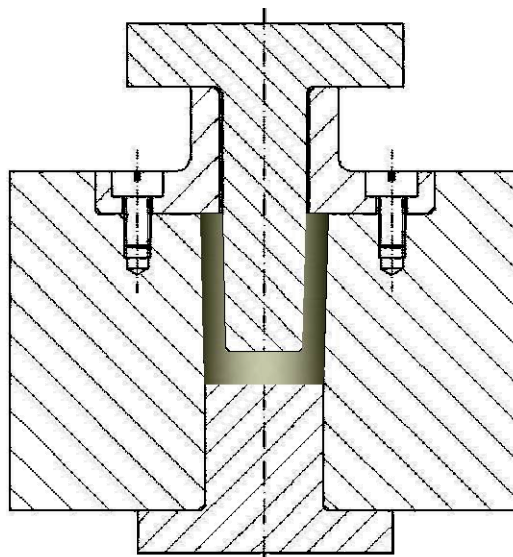


Рис. 4. Выдавливание заготовок под запрессовку основы в оболочку

2) Запрессовка титановой основы в трубную алюминиевую заготовку (рис. 5).

После очистки поверхностей кольцо—«оболочку» укладывают в полость контейнера, которая выполнена с таким же углом как и матрица-контейнер для выдавливания титановой «основы».

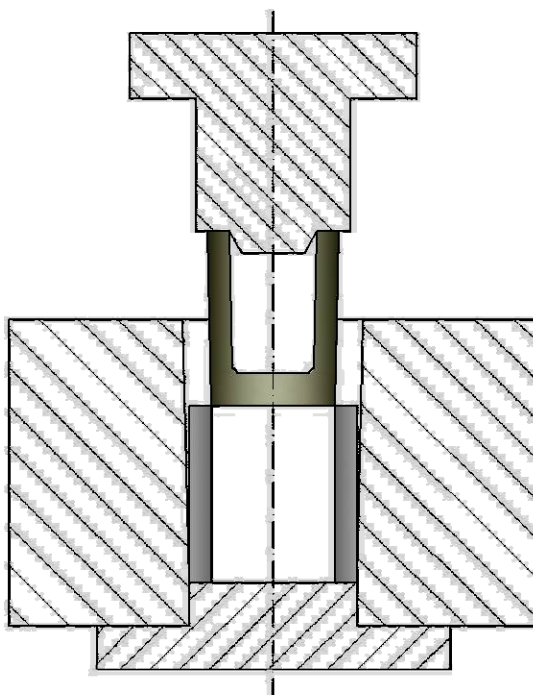


Рис. 5. Непосредственно запрессовка основы в оболочку

Технологически это можно объяснить тем, что для сохранения примерно одинаковой толщины плакирующего слоя по юбке поршня требуется внешний подпор для более пластичного алюминиевого слоя. После запрессовки получим поршень, равномерно расширяющийся кверху с углом наклона боковой стенки до  $1,5-2^\circ$ .

3) Протяжка полученного полуфабриката для придания деформации зоне контакта (для происхождения диффузионного сваривания этих материалов) и для получения заготовки нужного диаметра под механическую обработку (рис. 6) ориентировочно должна проводиться в горячем состоянии.

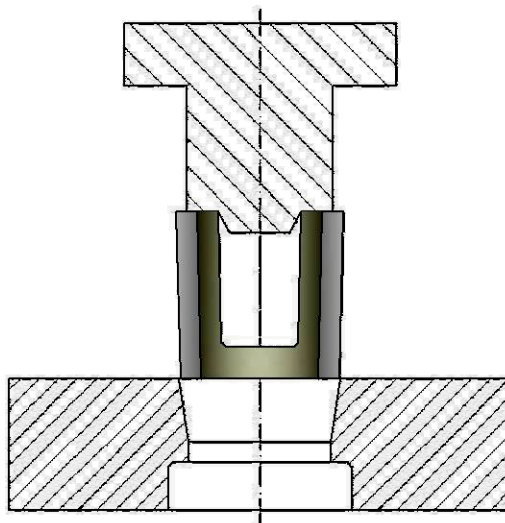


Рис. 6. Протяжка полуфабриката через матрицу с меньшим наружным диаметром для деформирования наружного слоя и границы сваривания

Под действием температуры и приложенных сил на границе материалов должны активно происходить процессы взаимной диффузии, что является неперенным условием получения неразрывного соединения. Требуемая для прочного соединения двух материалов степень деформации в зависимости от разницы диаметров матрицы и изделия будет устанавливаться по результатам проведенных опытов.

В настоящий момент исследование находится на стадии детальной проработки оснастки для проведения опытов. Если полученные практические результаты подтвердят правильность разработанной технологии, то возможно данная тема будет продолжена более детальными исследованиями, включающими в себя прочностные расчеты с помощью современных компьютерных программ в зависимости от варьирования основных параметров процесса. Кроме того, в случае положительных результатов, планируется по полученной разработке получить авторское свидетельство и внедрить полученный технологический процесс в реальное производство.

### Литература

1. *Мастеров В.А., Берковский В.С.* Теория пластической деформации и обработка металлов давлением. – М., «Металлургия», 1970. – 296 с.
2. *Гильденгорн М.С., Керров В.Г., Кривонос Г.А.* Прессование со сваркой полых изделий из алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1974. – 234 с.
3. Интернет–ресурс [ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org)
4. Интернет–ресурс «[Моторный центр АБ-Инжиниринг. Современные поршни](#)» (статья канд. техн. наук Хрулева А. «Современные поршни»).

УДК 621.77.01

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫДАВЛИВАНИЯ-ПРЕССОВАНИЯ

Мамаев Михаил Владимирович

*Аспирант 3 года обучения,  
кафедра «Обработка материалов давлением»,  
ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая  
академия имени П.А. Соловьёва»*

*Научный руководитель: А. С. Матвеев  
доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка материалов  
давлением»*

В различных областях машиностроения находят широкое применение различные детали, полученные при помощи выдавливания-прессования, надёжность работы которых при эксплуатации в значительной мере определяется технологией их изготовления. При этом качество и надёжность закладываются уже на начальных стадиях их производства – изготовлении заготовок горячим выдавливанием.

Следует отметить, что производственный опыт изготовления подобных заготовок показывает, что сбой технологического процесса выдавливания, выражающийся в возникновении факторов нарушающих оптимальные условия деформирования исходной заготовки, приводит, в отдельных случаях, к снижению усталостной прочности готовых изделий.

Имеющиеся математические модели и рекомендации не позволяют прогнозировать результаты и управлять процессом, поэтому в данной работе предложена одна из моделей, позволяющая избавиться от указанных выше недостатков, а также управлять процессом за счет изменения и оптимального подбора технологических параметров.

Данная модель должна позволить исследовать деформированное состояние и проводить его анализ в комплексе с напряженным состоянием. Это, в конечном итоге, позволит повысить механические, а, следовательно, и служебные свойства заготовок лопаток получаемых выдавливанием. Поэтому разработка и исследование математической модели процесса выдавливания, оптимизация его технологических параметров при изготовлении заготовок горячим выдавливанием является актуальной.

Общей же целью проводимых исследований является создание базы для компьютерных программ на основе математического моделирования процессов выдавливания-прессования, позволяющих решать вопросы отмеченные выше.

Для оценки качества продукции получаемой в заготовительном производстве методами обработки металлов давлением, в частности,



механических или других свойств материала заготовки, необходимо знать их величину и характер распределения в определенных сечениях или по всему объему заготовки, то есть, в конечном счете, в каждой конкретной требуемой точке.

Прогнозирование этих свойств возможно на основании знаний исходных данных и анализа напряженного состояния, например, с помощью показателей предлагаемых различными авторами.

Показатель напряженного состояния в точке по В. Л. Колмогорову оценивается безразмерной величиной – отношением  $\sigma / T$ .

Величину  $\sigma$ , составленную из линейного инварианта, и входящую в отношение  $\sigma / T$ , называют средним нормальным напряжением в точке и определяют по следующей формуле:

$$\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3. \quad (1)$$

Среднее нормальное напряжение – инвариантная величина – характеризует уровень нормальных напряжений в некоторой точке деформируемого тела.

Величину  $T$ , составленную из второго инварианта девиатора напряжений, и входящую в отношение  $\sigma / T$ , называют интенсивностью касательных напряжений и определяют по следующей формуле:

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{|I_2(D_\sigma)|} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, для определения показателя  $\sigma/T$ , который некоторые исследователи называют коэффициентом жесткости схемы напряженного состояния, может быть определен если известны все нормальные и касательные компоненты напряжений.

Поэтому была предложена математическая модель прямого осесимметричного выдавливания через плоскую ступенчатую матрицу, т.е. без конических, торообразных или других сложных поверхностей.

На рис. 1 представлена схема и принятые обозначения при прямом прессовании-выдавливании через плоскую ступенчатую матрицу.

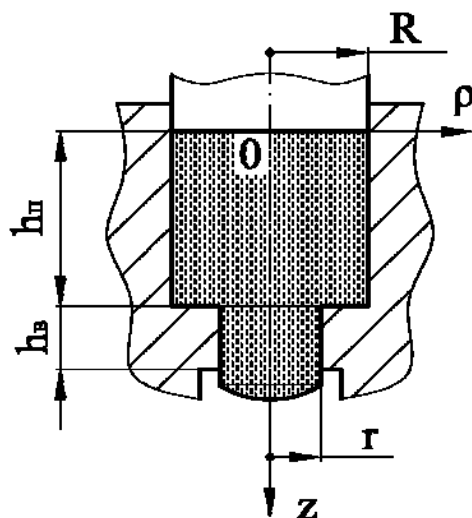


Рис. 1. Схема прямого осесимметричного выдавливания-прессования через плоскую ступенчатую матрицу и принятые обозначения

На основании теоретического анализа напряженного состояния получены результаты позволяющие оценивать влияние коэффициента контактного трения  $\mu$ , геометрического параметра  $h_b / r$ , то есть условий на выходном участке матрицы, а также стадии протекания процесса на локализацию области интенсивного пластического течения в процессах прямого осесимметричного выдавливания-прессования, как это показано на рис. 2 (для малого значения коэффициента трения  $\mu$ ) и рис. 3 (для различных значений коэффициента трения  $\mu$ ).

Показано, что относительная высота выходного участка  $h_b / r$  в равной мере, но в тоже время в еще больших пределах может оказывать (также как и коэффициент контактного трения  $\mu$ ) основное и весьма значительное влияние на величину и соотношение в очаге интенсивного пластического течения зон скольжения и застоя (прилипания), то есть на картину и неравномерность течения деформируемого металла, а, следовательно, на все силовые характеристики.

Получены формулы для определения компонентов тензора напряжений —  $\sigma_z, \sigma_\rho, \tau_{\rho z} = \tau_{z\rho}$ , таким образом при подстановке в формулы (1) и (2) при замене  $z = z$  и  $x = \rho$  возможно вычисление показателя напряженного состояния  $\sigma / T$  в любой точке зоны интенсивного пластического течения.

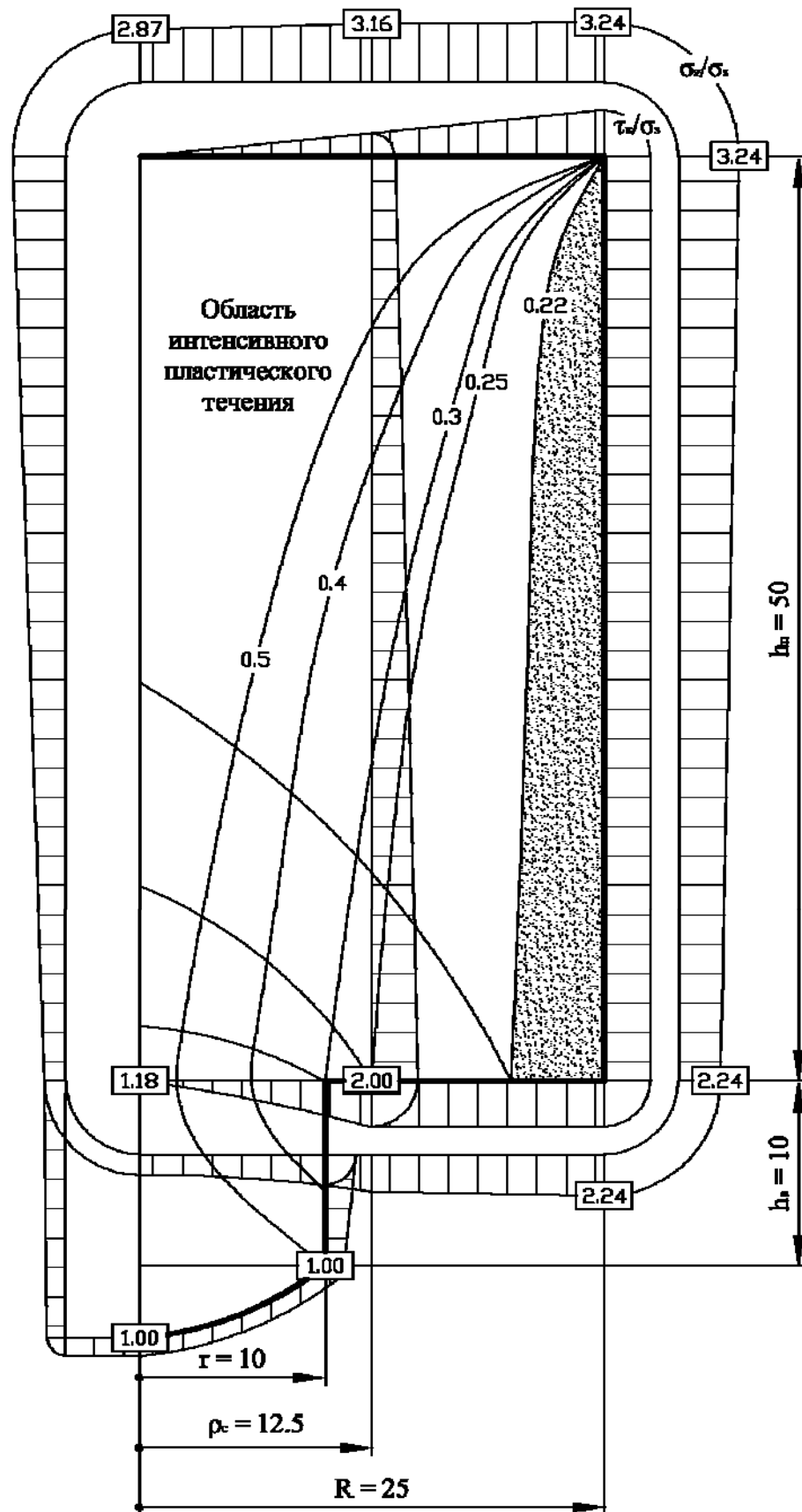


Рис. 2. Эпюры относительного напряжения  $\sigma_z/\sigma_s$ , построенные расчетным путем при  $\mu = 0,17$ ;  $r = 10$  мм;  $R = 25$  мм;  $h_b = 10$  мм;  $h_m = 50$  мм

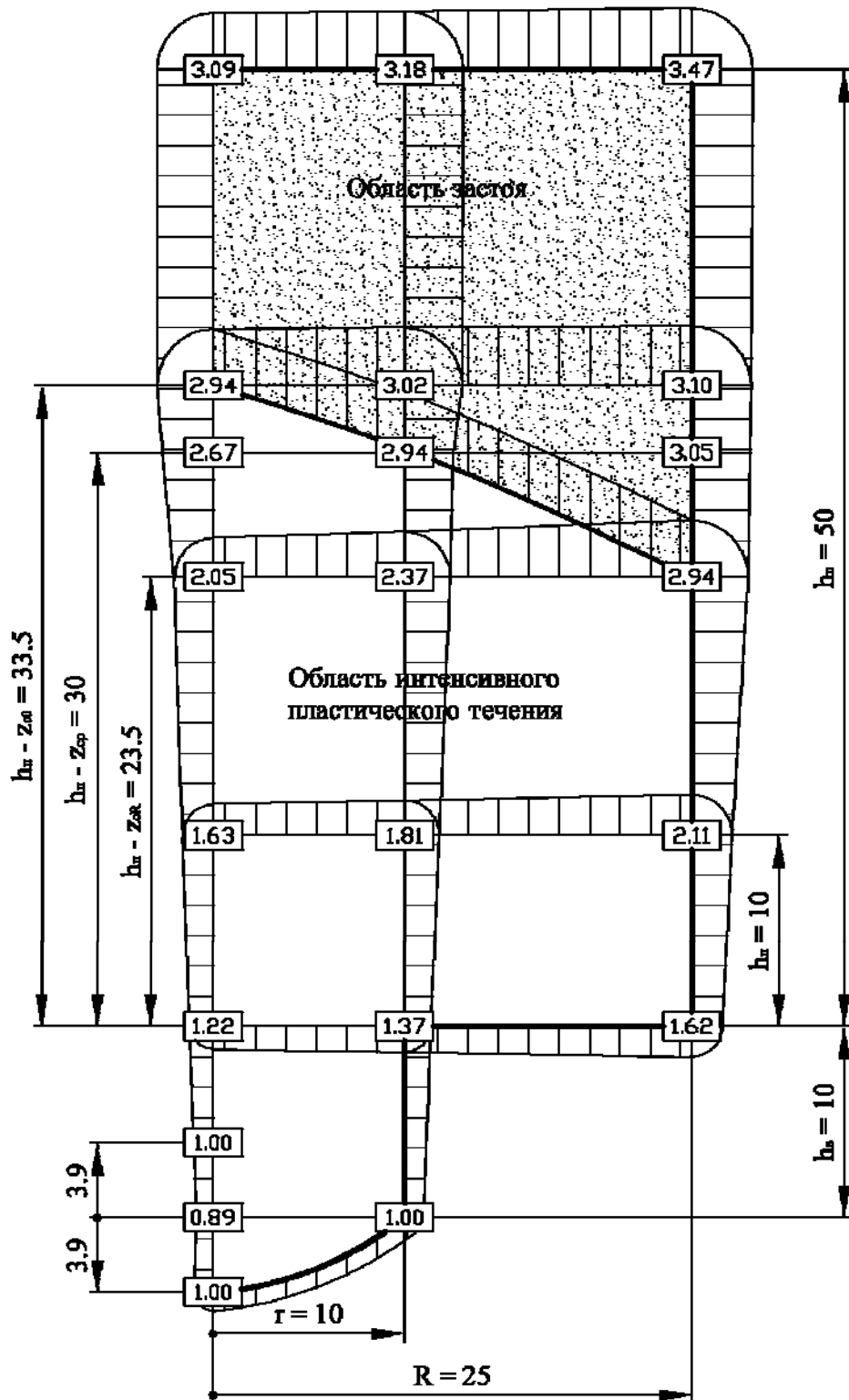


Рис. 3. Эпюры относительных напряжений  $\tau_{\text{к}}/\sigma_{\text{с}}$ ;  $\sigma_{\text{z}}/\sigma_{\text{с}}$  и область очага интенсивной пластической деформации, построенные расчетным путем при  $r = 10$  мм;  $R = 25$  мм;  $h_{\text{в}} = 10$  мм;  $h_{\text{п}} = 50$  мм;  $\mu > 0,2$

Таким образом, предложенная математическая модель учитывает влияние на характер протекания, а также на результат процесса выдавливания, целого ряда следующих основных факторов:

- трения на поверхностях контакта металла с инструментом;
- степени деформации;
- формы и размеров канала матрицы.

На основании перечисленного выше стало возможно создание программного продукта (рис. 4), где в качестве исходных данных вводятся следующие параметры: коэффициент контактного трения  $\mu$  и геометрические параметры инструмента ( $h_B$ ;  $h_{II}$ ;  $R$ ;  $r$ ).

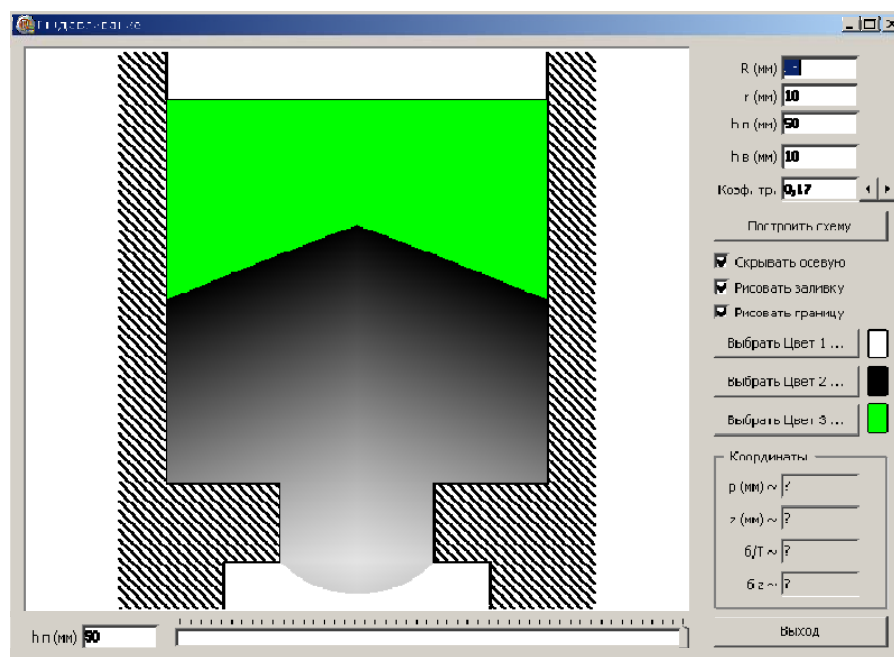


Рис. 4. Внешний вид основного окна программы по расчету напряженного состояния

В качестве выходных получаем следующие данные:

- значение величины напряжения  $\sigma_z$  в любой точке области пластической деформации, а, следовательно, при необходимости и остальные компоненты тензора напряжений –  $\sigma_r$  и  $\tau_{rz} = \tau_{zr}$ ;
- значение величины показателя напряженного состояния  $\sigma / T$  в любой точке области пластической деформации;
- графическое представление границы между областью пластического течения и застойной областью;
- распределение показателя напряженного состояния  $\sigma / T$  в графическом виде, то есть соответствующим цветовым переходом от меньшего значения показателя к большему (для области пластического течения металла).

На рис. 5 показаны результаты моделирования при  $\mu = 0,17$ ;  $r = 10$  мм;  $R = 25$  мм;  $h_b = 10$  мм, которые ставили целью проанализировать влияние высоты пресс-остатка на изменение напряженного состояния.

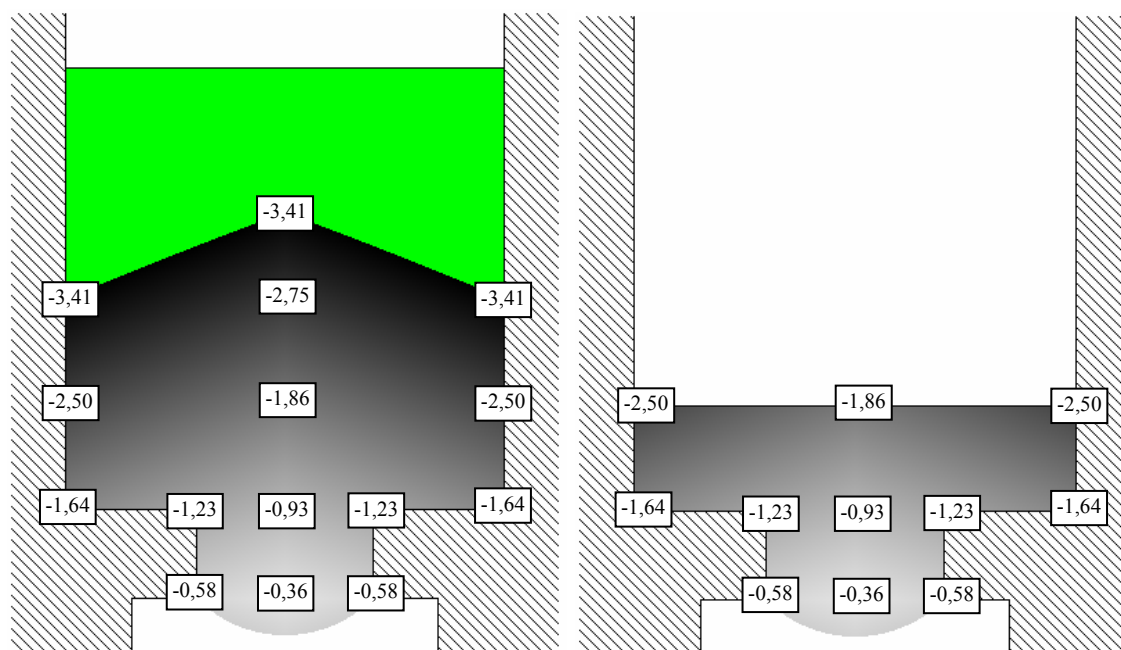


Рис. 5. Распределение показателя напряженного состояния  $\sigma / T$  по объему прессуемого изделия ( $h_{п} = 50$  мм и  $h_{п} = 12$  мм)

Анализ показывает, что при  $h_{п} = 12$  мм (что соответствует среднему значению высоты зоны пластического течения для случая, где  $h_{п} = 50$  мм) напряженное состояние во всех характерных точках осталось прежним, несмотря на то, что весь объем приемника охвачен пластической деформацией, а застойная зона отсутствует.

Кроме того, на рис. 5 видно, что распределение показателя  $\sigma / T$  по объему прессуемого изделия является весьма неравномерным – при принятых входных параметрах разница составила примерно в 10 раз.

Анализ полученных данных и тональная картина изменения показателя позволяет выделить крестообразную зону, образованную пересечением центральной оси  $z$  с плоскостью проходящей через нижнюю границу калибрующего пояска матрицы, где показатель  $\sigma / T$  имеет минимальное значение.

УДК 621.882.55/.56:621.77

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ШТАМПОВКИ ВЫСОКИХ ГАЕК ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Панков Антон Юрьевич

*Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»  
Омский Государственный Технический Университет*

*Научный руководитель: В.Г. Штеле  
ассистент кафедры «Машины и технология обработки металлов  
давлением»*

Обработка давлением один из основных способов получения заготовок и деталей в машиностроении. Широкое применение заготовок и деталей, полученных обработкой давлением, объясняется их малой стоимостью, большой производительностью изготовления, малой материалоемкостью, высокой точностью и качеством поверхности.

В основе физической сущности различных видов обработки давлением лежат общие закономерности, на основании которых возможно управление физическими свойствами деталей и процессом формообразования[1].

При разработке технологии объемной штамповки заготовок высоких гаек, определенные трудности связаны с заполнением относительно высокой гравюры матрицы. Поэтому большое значение имеет анализ заполнения угловых полостей шестигранной матрицы.

Важным элементом технологии горячей объемной штамповки являются условия нагрева (режим, температура, скорость). Эти параметры особенно важны при обработке легированных сталей. В производственных условиях данные задачи следует решать в комплексе, поэтому необходимо рассмотреть проблемы компоновки, выбора штамповочного оборудования и нагревательных устройств, конструкций и схем штампов, подготовку заготовок.

В подавляющем большинстве случаев при выталкивании из формующих матриц на гранях появляются риски, возникает налипание металла на инструмент (адгезия). Средства и способы смазки этих поверхностей не всегда дают положительный эффект. Особенно актуальной эта проблема является для аустенитных коррозионно-стойких сталей, наделенных свойством повышенной адгезии. С другой стороны, именно такие стали наиболее востребованы в нефтяной, газовой и химической промышленности[2].

Одним из перспективных решений является использование неподвижных секционных матриц, но данная технология имеет также и свои недостатки, такие как:

1. Высокое удельное усилие деформации, возникающее вследствие обратного выдавливания

2. Быстрый износ прошивного инструмента и секционных матриц.

Для изготовления таких гаек целесообразно использовать подвижный секционный инструмент, позволяющий улучшить качество поверхности граней. Примеры использования такого инструмента для изготовления данных изделий, получаемых горячей объемной штамповкой, имеются в отечественной и зарубежной практике. Исследование этих конструкций привело к созданию аналогичного инструмента для штамповки высоких гаек из нержавеющей сталей.

Для изготовления данного вида деталей и решения проблем, возникающих при штамповке с использованием ранее спроектированных конструкций, разработана двухпереходная технология штамповки поковок высоких гаек. Технологический процесс состоит из:

1. штамповки поковки;
2. прошивки отверстия.

По предлагаемой технологии, боковые грани поковки не нуждаются в дополнительной обработке, кроме очистки от окалины, следовательно, при расчете размеров поволок припуски на размер под ключ не назначаются.

Для штамповки данной детали наиболее рационально будет использовать заготовки цилиндрической формы, полученные разделкой горячекатаного, круглого проката. Размеры заготовки определяются двумя составляющими: диаметром, определяемым по диаметру углубления в матрице, необходимым для центровки заготовки относительно верхнего и нижнего инструмента, и объемом заготовки, рассчитанным исходя из объема поковки и потерь на угар (0,2-0,4%, так как нагрев производится в индукционной установке). На рис.1 представлены 3D модели заготовки, поковки и гайки, разработанные в системе трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D v10.

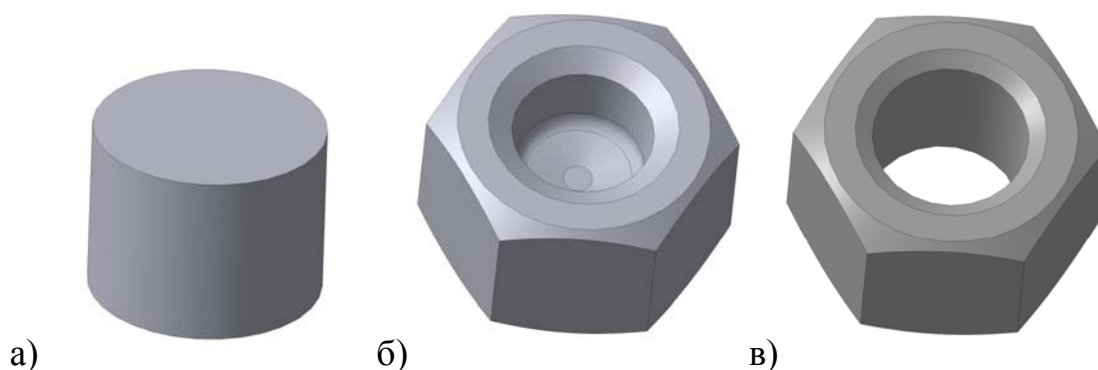


Рис. 1. 3D модели: а) заготовка; б) поковка гайки; в) гайка

Прототипом конструкции выбран принцип рычажного штампа, широко применяемого при изготовлении деталей типа: «крестовина» и «тройник». В связи с этим сконструирован штамп со сходящимися, секционными матрицами, который состоит из следующих основных элементов (рис. 2): 1 -



нижняя плита, 2 - верхняя подвижная плита, 3 - плавающая плита, 4 – секции матрицы, 5 - верхний инструмент, 6 - прижим-съёмник.

Штамп работает по следующему принципу:

Штамп в разомкнутом положении (рис. 2): подвижная плита 3 под действием буфера Q находится в верхнем крайнем положении; секции матрицы 4 разведены.

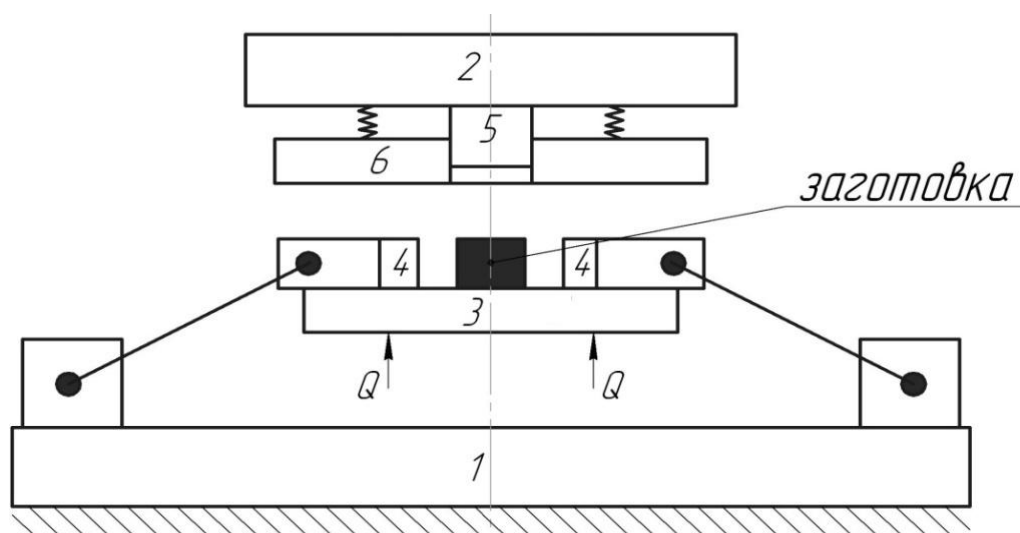


Рис. 2. Положение штампа в разомкнутом состоянии

При ходе ползуна вниз (рис. 3): верхняя плита 2, верхний инструмент 5 и прижим-съёмник 6 под действием силы P движутся вниз; верхний

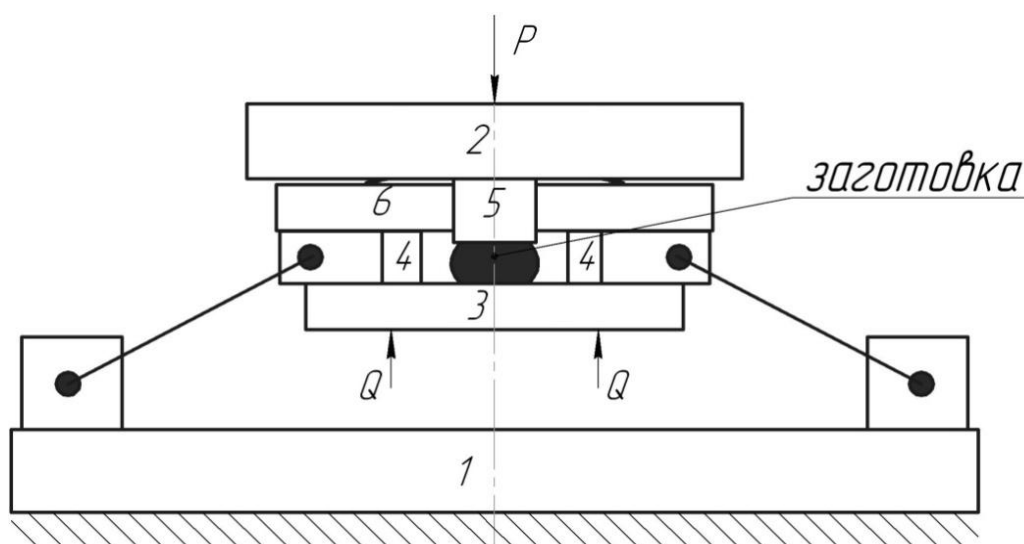


Рис. 3. Положение штампа при ходе ползуна вниз

инструмент внедряется в заготовку. Подвижная плита 3 находится в статичном состоянии до касания прижима-съёмника 6 кареток, в которых движутся секции матрицы 4.

Движение подвижной плиты 3 (рис. 4): прижим-съёмник 6 упирается в плиту 2 и ползун, с закреплённой на нем секцией матрицы 4, создавая жесткую передачу усилия P на плиту 3. Усилие P возрастает, превышая усилие буфера Q. Плита 3 движется вниз, увлекая за собой ползуны, с

секциями матрицы 4, которые жёстко связаны через рычаги с нижней плитой. Секции матрицы 4 под действием рычагов смыкаются, деформируя боковые грани заготовки.

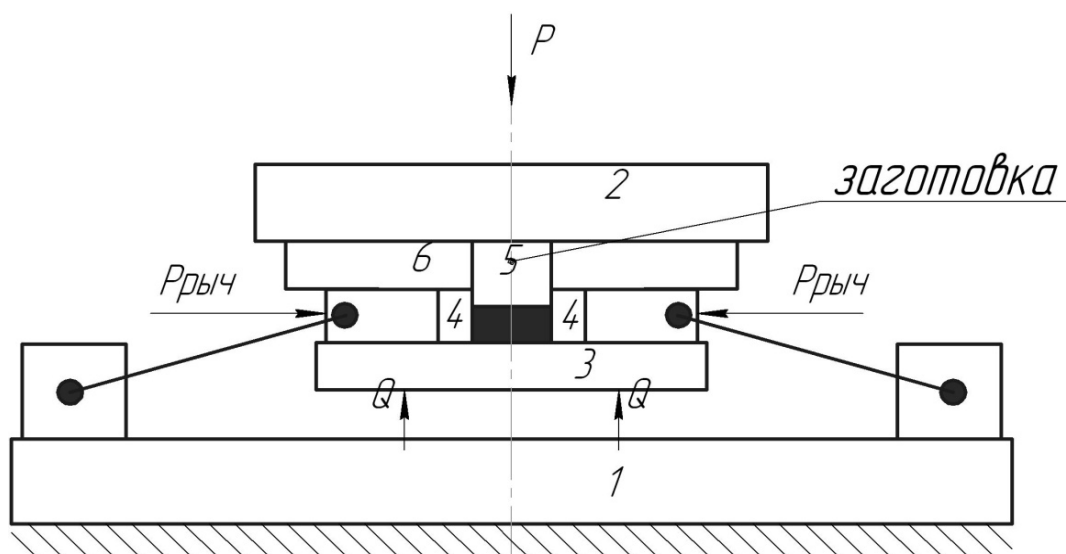


Рис. 4. Положение штампа во время движения подвижной плиты

Движение ползуна вверх (рис. 5): плита 2 движется вверх, а усилие буфера Q заставляет плиту 3 и секции матрицы 4 двигаться совместно вверх. Тем самым отводя секции матрицы от стенок заготовки.

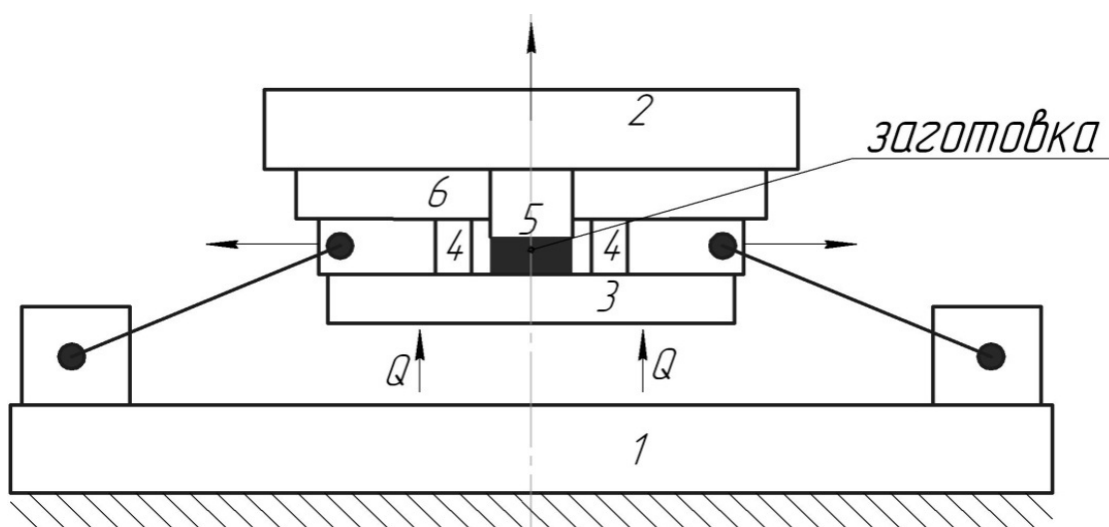


Рис. 5. Положение штампа при движении ползуна вверх

Возвращение в исходное положение: плита 3 возвращается в верхнюю крайнюю точку. Если поковка задерживается на знаке верхнего инструмента, то снимается прижимом-съемником 6.

Данный принцип имеет следующие преимущества:

- снижает износ знака верхнего инструмента, за счёт открытой осадки.
- уменьшает трение металла о боковые грани инструмента, т.к. формирование боковых граней происходит преимущественно осадкой, а не обратным выдавливанием.

- за один ход ползуна пресса выполняются два перехода ввиду наличия конртпуансона 8 (рис. 8), внедряющегося в поковку снизу при движении подвижной плиты вниз.

- более рационально используется усилие пресса, т.к. рычаги, воспринимая осевое движение ползуна пресса, преобразуют его в радиальное движение секций матрицы. При таком подходе уменьшается общее усилие штамповки по сравнению с используемыми ранее подходами.

Спроектированный штамп состоит из верхней и нижней частей. В верхней части (рис. 6), закрепленной к ползуну пресса, собраны следующие детали: верхняя плита 1, съемник 2 с втулкой съемника 3 и пуансон 4 со сменным инструментом. К верхней плите 1 присоединен пуансон 4 со сменной твердосплавной вставкой, которая выполняет роль прошивного пуансона 5. Съемник 2 крепится к верхней плите при помощи шпилек 6, находится в подпружиненном состоянии и отвечает за сьем поковки с верхнего знака. Так же в верхнюю плиту запрессованы направляющие втулки 7.

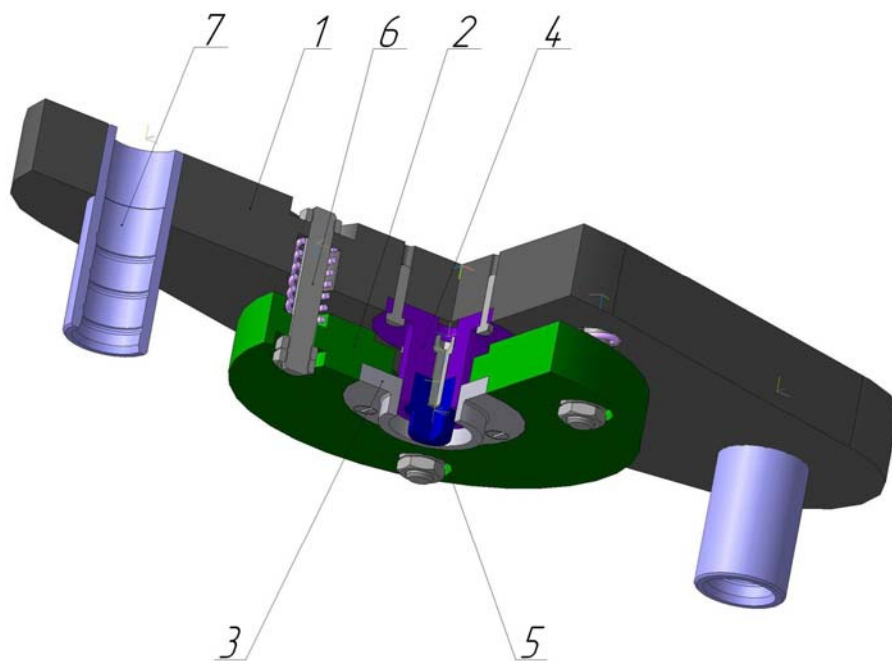


Рис. 6. Верхняя часть штампа

Нижняя часть (рис. 7,8) состоит из: нижней плиты 2, подвижной плиты 3, шести рычажных узлов наладки и буферного устройства (тарельчатые пружины 18). На нижней плите 2 закреплено кольцо 1, на которое приходятся распорные усилия создаваемые рычагами 12. направляющие колонки 4 для верхней плиты и

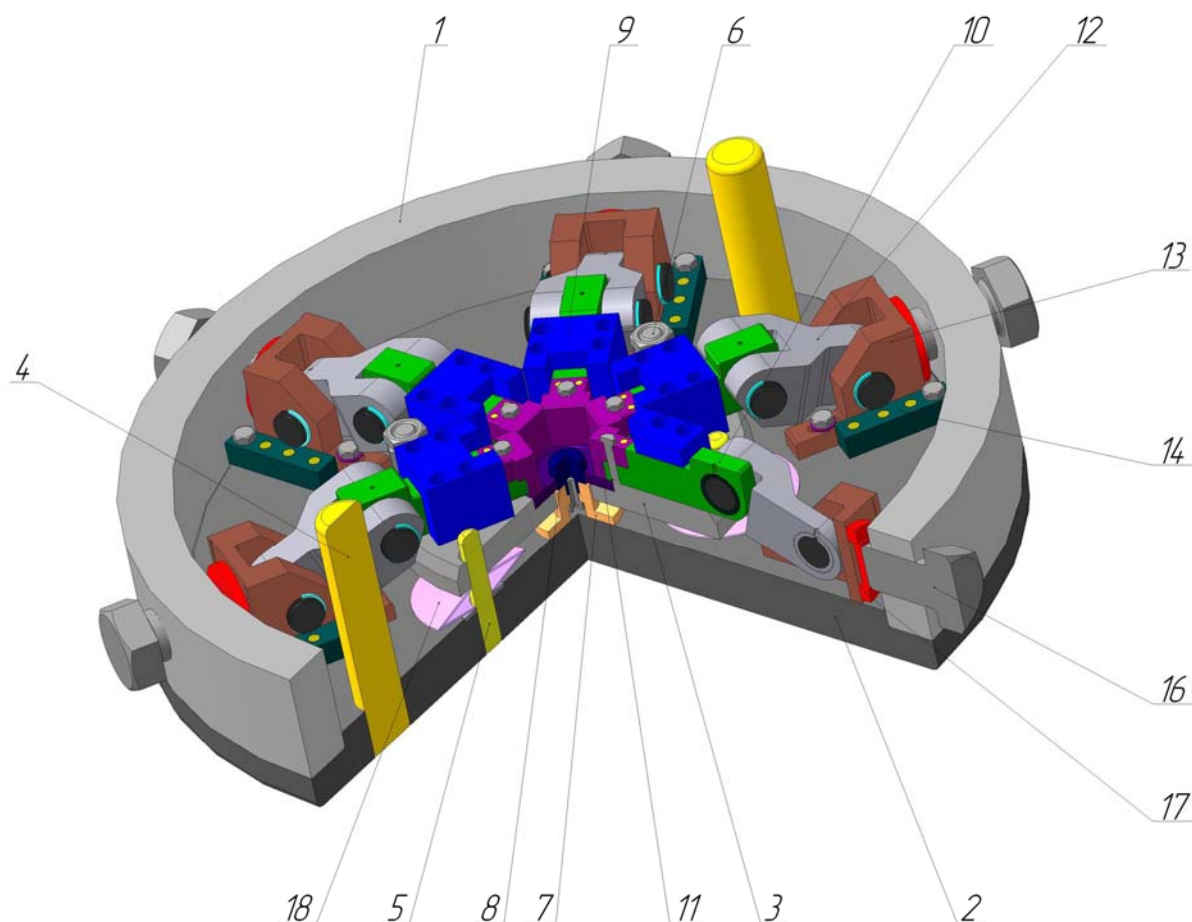


Рис.7. Нижняя часть штампа

колонки 5 и шпильки 6 для подвижной плиты 3. В центре плиты 2 на опоре 7 расположен контрпуансон 8. Подвижная плита 3 крепится к нижней плите посредством трех шпилек 6, а три малые колонки 5 служат для подвижной плиты и тарельчатых пружин направляющими элементами. Шесть наборов тарельчатых пружин 18 представляют из себя буферное устройство между подвижной и нижней плитой. Тарельчатые пружины набраны попарно в три комплекта и расположены навстречу друг другу, для увеличения рабочего хода. На подвижной плите 3 под углом  $60^\circ$  друг относительно друга расположены шесть направляющих 9, внутри которых находятся ползушки 10. К ползушкам крепятся твердосплавные вставки матрицы 11, соответствующие типоразмеру штампуемых поковок. Движение ползушкам 10 передается через рычаги 12, которые крепятся к нижней плите посредством регулируемой каретки 13. Сама каретка имеет возможность перемещаться вдоль планок 14 при помощи винта 16, тем самым позволяя регулировать ход ползушек 10. Фиксируется каретка с нижней плитой при помощи болтов. Для исключения самопроизвольного смещения каретки 13 и поломки ответственных деталей предусмотрено предохранительное устройство 17 типа продавливаемая чашка.

Работа штампа описана на рис. 8. Заготовка устанавливается на подвижную плиту в углубление опоры 15. Углубление опоры и верхний

торец контрпуансона 8 находится в одной плоскости. При движении ползуна вниз происходит внедрение прошивного пуансона 19 в заготовку и касание подпружиненного съемника 22 направляющих 9. При этом подвижная плита 3 удерживается наборами тарельчатых пружин 18 в статичном состоянии, что не позволяет ей опускаться. Чтобы предотвратить врезание тарельчатых пружин в нижнюю плиту 2, под ними устанавливаются закаленные прокладки. Когда верхняя плита 23 коснется съемника 22, происходит полное внедрение прошивного пуансона 19 в заготовку и осадка ее пуансоном 20 до заданной величины. Далее движение верхней плиты 23 передается через съемник 22 и направляющие 9 подвижной плите 3, происходит сжатие наборов тарельчатых пружин 18. Плита 3 начинает двигаться вниз, одновременно с этим происходит внедрение контрпуансона 8 в заготовку. Под действием рычагов 12, жестко закрепленных на нижней плите 2, ползушки 10 начинают двигаться радиально, смыкая секции матрицы 11. Происходит формирование боковых поверхностей поковки гайки. В момент конечного смыкания

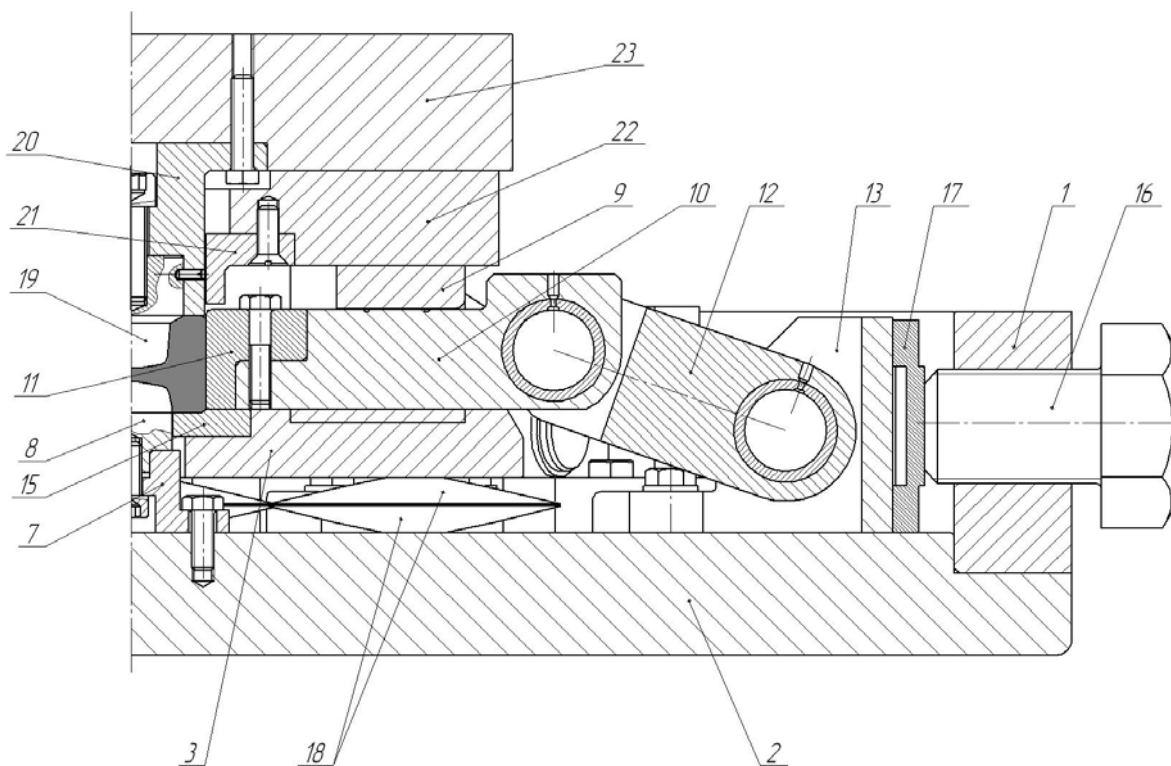


Рис. 8. Схема работы штампа

секций матрицы 11 при неправильной регулировке или нарушении температурного режима штамповки возможен рост усилия превышающего предельно допустимое значение, выдерживаемое деталями штампа. Такая ситуация может привести к разрушению дорогостоящих деталей и поломке штампа. Для исключения поломки установлено предохранительное устройство, состоящее из продавливаемой чашки 17 и регулировочного винта 16, который ввинчивается в кольцо 1. При проектировании

предохранительного устройства рассчитаны прочностные характеристики винта 16 и продавливаемой чашки 17.

При ходе ползуна вверх усилие, созданное сжатием тарельчатых пружин 18, поднимает подвижную плиту 3, тем самым снимая поковку с твердосплавной вставки контрпуансона 8, крепящейся к нижней плите при помощи опоры 7. Под воздействием движущейся вверх подвижной плиты, секции матрицы 11 движутся в сторону от боковой поверхности поковки гайки. Подвижная плита 3 возвращается в исходное положение. Поковка двигается вместе со вставкой прошивного пуансона 19 вверх и упирается во втулку съемника 21. Под действием усилия сжатых пружин съемника 22 происходит снятие поковки с прошивного пуансона 19.

При помощи специализированной программы, позволяющей моделировать процесс горячей штамповки, получены графики усилий штамповки гаек различных типоразмеров (рис. 9).

Графики имеют форму характерную при открытой прошивке. На графиках обозначены точки начала перемещения подвижной плиты. Подвижная плита начинает свое движение в момент, когда верхняя плита надавит съемником 22 (рис. 8) на направляющие 9 ползушек. Для каждого типоразмера штампуемых поволоков гаек рассчитано усилие штамповки и подобран комплект тарельчатых пружин.

Использование штампа данной конструкции позволит получать поковки гаек с более качественной поверхностью боковых граней. Это снизит себестоимость производства и ускорит производственный цикл данного вида изделий.

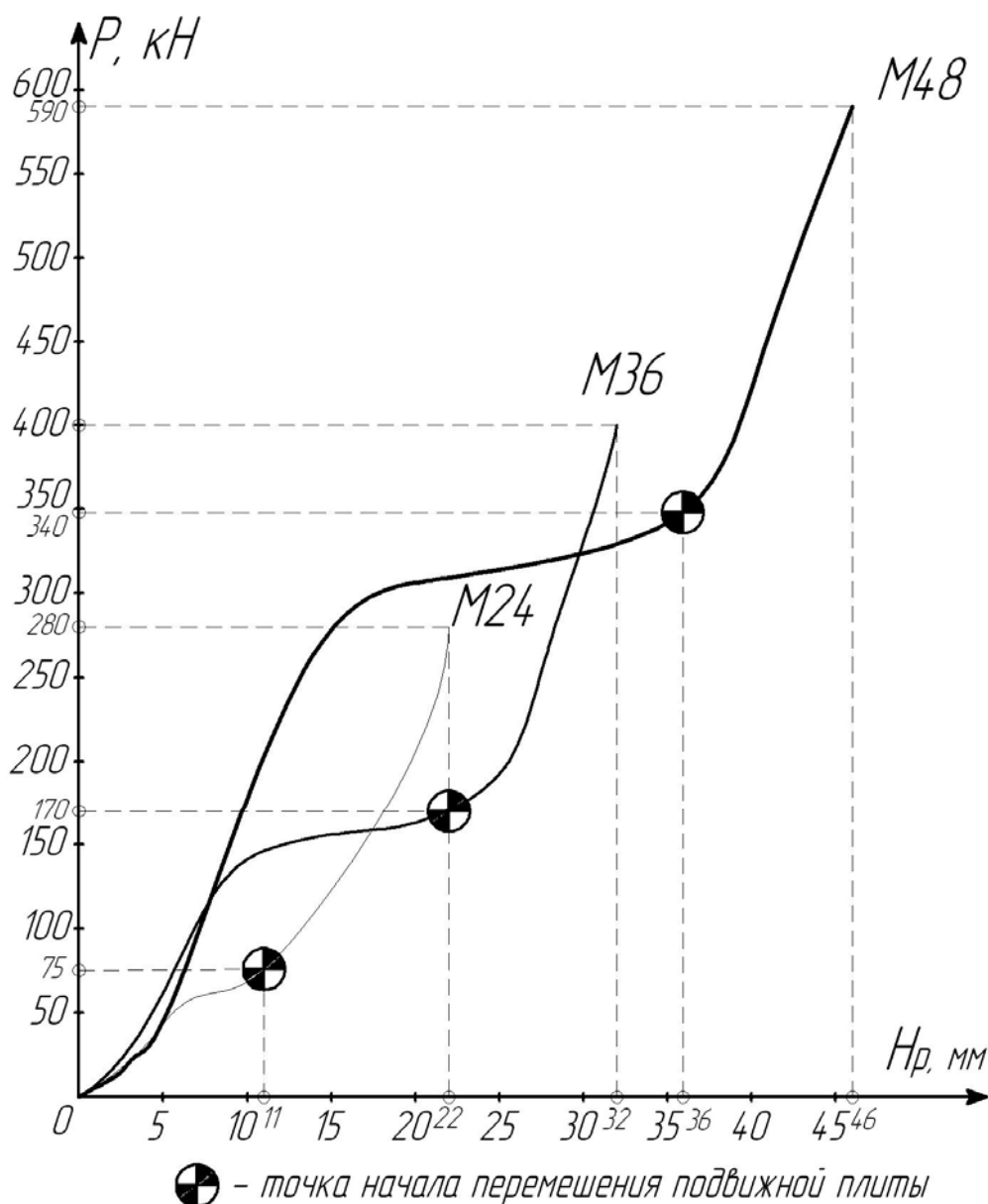


Рис. 9. График усилие – рабочий ход для штамповки поковок гаек M24, M36, M48

### Литература

1. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов/ М.В.Сторожев, Е.А.Попов. М.: Машиностроение, 1977 г. 423с.
2. ГОСТ 9064-75. Болты, шпильки, гайки и шайбы для фланцевых и анкерных соединений с температурой среды от 0 до 650°C. Типы и основные размеры [Текст]. – Взамен ГОСТ 9064-69 ; введ. 1976-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 6 с.

УДК 621.73.047:621.45.226.2

## РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ АНАЛИЗА ВАЛЬЦЕВАНИЯ ПЕРА ЛОПАТКИ ГТД.

Смирнова Татьяна Сергеевна

Студент пятого курса

Кафедра «Обработка материалов давлением»

ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А.Соловьева»

Научный руководитель: Первов Михаил Леонидович,

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка материалов давлением».

Холодная прокатка по сравнению с горячей имеет два больших преимущества: во-первых, она позволяет производить листы и полосы толщиной менее 0,8–1 мм, вплоть до нескольких микрон, что горячей прокаткой недостижимо; во-вторых, она обеспечивает получение продукции более высокого качества по всем показателям - точности размеров, отделке поверхности, физико-механическим свойствам. Эти преимущества холодной прокатки обусловили ее широкое использование, как в черной, так и в цветной металлургии.

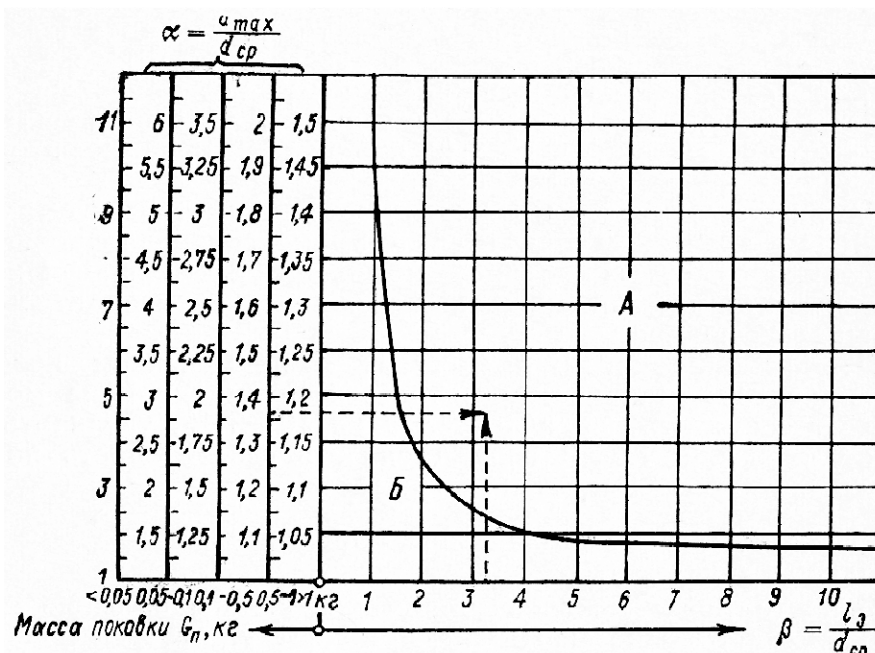


Рисунок 1. Диаграмма для определения необходимости применения вальцовки заготовок: А – зона штамповки, где требуется применение вальцовки; Б – зона штамповки, где не требуется применения вальцовки



Для определения необходимости вальцовки заготовок пользуются диаграммой, представленной на рис. 1. На основании полученной расчетной заготовки (эпюры диаметров) предварительно подсчитывают параметры, характеризующие сложность процесса, а именно:

$$\alpha = d_{\max} / d_{\text{ср}}$$

$$\beta = l_3 / d_{\text{ср}}$$

и массу поковки –  $G_n$ . Пользуясь диаграммой (рис. 3) и величинами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $G_n$ , устанавливают необходимость применения ковочных вальцов для получения фасонной заготовки при штамповке данной поковки.

### Определения количества пропусков при вальцовке

На основании исследований ЭНИКмаша и внедрения технологии вальцовки заготовок при штамповке большого количества различных поволоков на автотракторных заводах страны показано, что подавляющее большинство заготовок для удлиненных поволоков при  $A / h_0 = 4 - 6$  может быть получено не более чем за два пропуска.

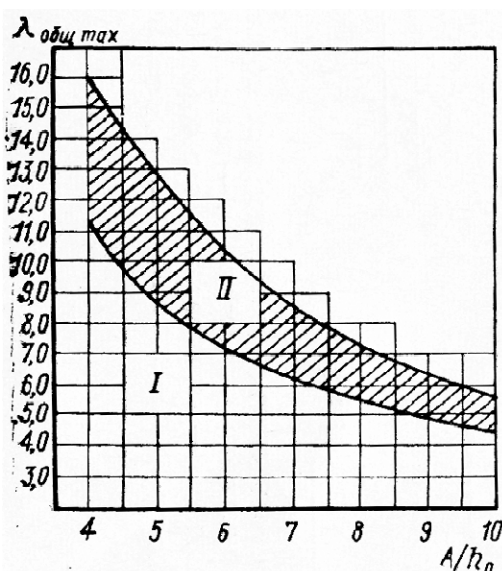


Рисунок 2. График для определения количества пропусков: I – зона вальцовки за два пропуска; II – зона вальцовки за три пропуска

В номенклатуре автотранспортной и инструментальной промышленности таких поволоков насчитывается около 90 – 95%.

Экспериментальными исследованиями ЭНИКмаша установлено, что средний коэффициент вытяжки за один пропуск не должен превышать двух, то есть  $\lambda_{\text{ср}} \leq 2$ . Однако, применяя профилировку заготовок с интенсивными обжатиями, коэффициент вытяжки за один пропуск в зависимости от величины отношения  $A / h_0$  можно увеличить до трех-четырех.

Необходимое количество пропусков при вальцовке различных заготовок можно определить с помощью графика, представленного на рис. 2, где области применения двухручьевой и трехручьевой вальцовки даны в зависимости от  $\lambda_{\text{общ.мах}}$  и отношения  $A / h_0$ .

Если величина отношения осей  $a_1$  поперечного сечения заготовки после первого пропуска для получения заданного коэффициента вытяжки  $\lambda_{\text{общ, max}}$  будет меньше  $a_{1max}$ . То есть  $a_1 \leq a_{1max}$  то вальцовку можно осуществлять за один пропуск.

### Разработка методики расчёта основных параметров вальцовки

Вальцевание пера лопатки происходит в вальцовочных накладках на валки, при этом уширение пера лопатки очень незначительно (менее 1...5%), поэтому при разработке модели вальцевания будем считать, что уширение отсутствует, а деформация идет за счет уменьшения высоты пера лопатки и увеличения его длины. Перо лопатки разобьем на участки по длине и по ширине. Длина участка определяется средней длиной очага деформации; а по ширине пера лопатки будем рассматривать  $k$  – участков. Количество участков будет определяться закруткой лопатки. Чем больше угол закрутки пера, тем на большее количество участков он разбивается. В результате данного расчёта мы должны определить моменты на валках при вальцовке пера лопатки, а также выяснит будет ли происходить его изгиб при выходе из валков.

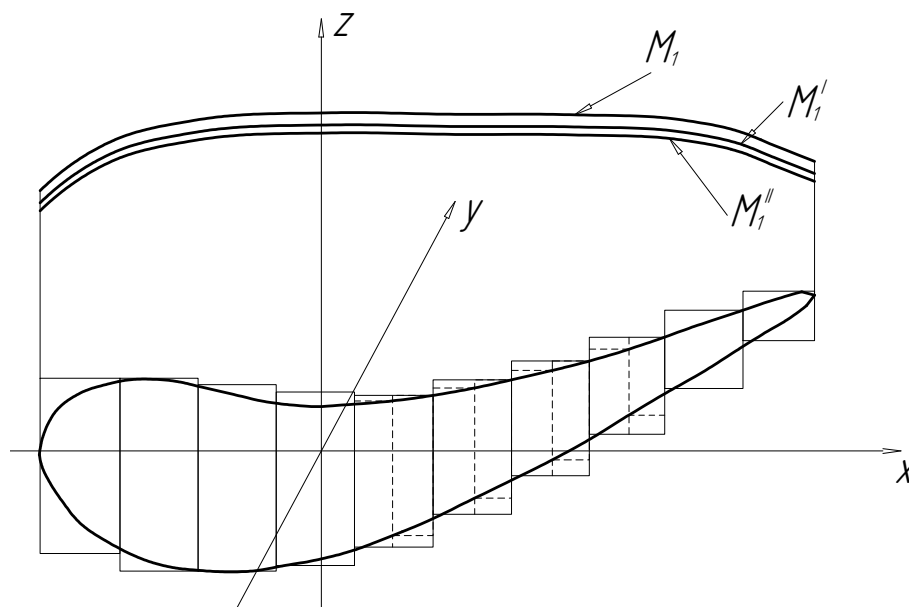


Рисунок 3. Эпюры изгибающих моментов по корыту пера лопатки, в зависимости от количества элементов

Из рисунка 3 видно, что с увеличением количества элементов, на которые разбивается перо лопатки, значение изгибающего момента изменяется. Составим алгоритм, по которому для лопатки можно рассчитать количество элементов, на которые далее её можно будет разбить и произвести дальнейшие расчеты параметров вальцевания профиля пера лопатки.  $M_i$  эпюра изгибающего момента при разбиении профиля пера лопатки на  $k$  элементов,  $M_i'$  - на  $(k + 10 \cdot n)$  элементов. Расчет количества элементов проводится по следующей зависимости:

$|M_i - M_{i'}| < \delta$ , где  $\delta$  – некоторое число.

Когда разность изгибающих моментов сравнивается с числом  $\delta$ , расчет количества элементов останавливаем. Таким образом, можно рассчитать количество элементов, на которые далее можно будет разбить профиль пера лопатки.

Для определения моментов вальцевания сечение лопатки разбиваем на прямоугольники одинаковой ширины  $\Delta\chi$  (рис. 4). Для каждого такого элемента производим расчёт моментов на нижней и верхней вставке, а затем, просуммировав их, определяем суммарные моменты.

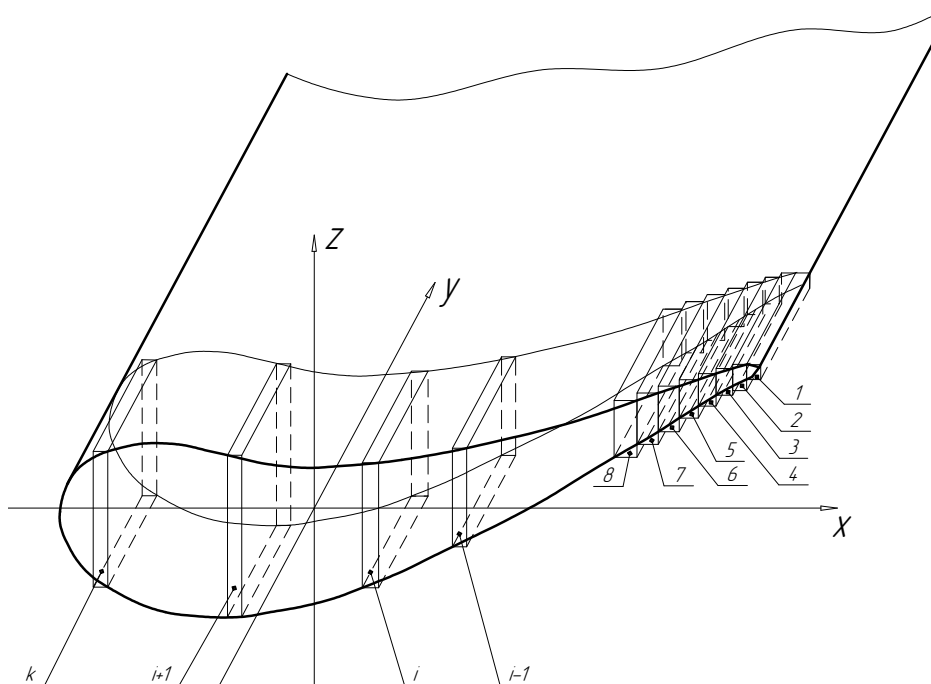


Рисунок 4. Профиль пера лопатки разбитый на прямоугольные элементы

Рассмотрим схему деформирования  $i$ -го элемента (рисунок 5). Как было отмечено ранее, уширение пера лопатки незначительно и им пренебрегаем, поэтому деформация элемента в направлении оси  $x$ , также отсутствует ( $\epsilon = \text{const}$ ). В зависимости от нахождения  $i$ -го элемента в сечении лопатки и её угла закрутки, будем изменять и расстояние до оси вращения валков. Рассматривая деформацию  $i$ -го элемента, как плоскую прокатку листа в валках разного диаметра, мы можем определить крутящие моменты на валках, по спинке и корыту пера лопатки.

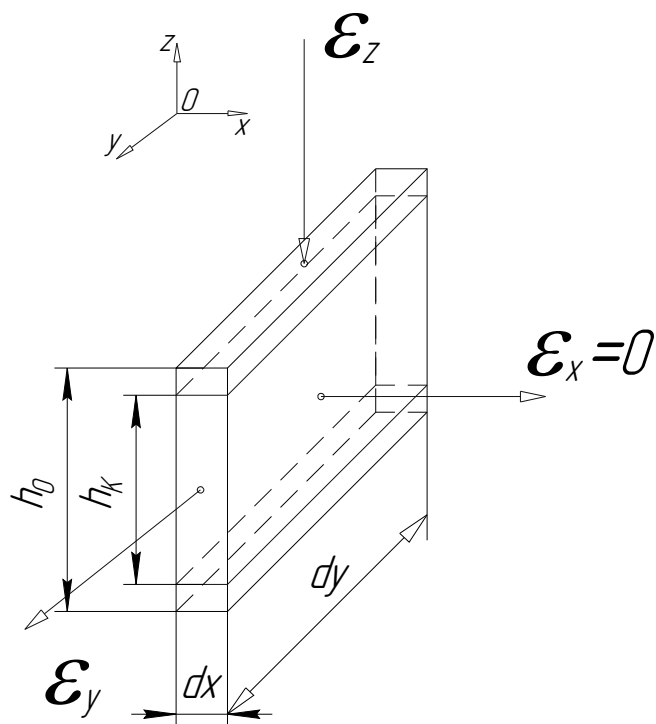


Рисунок 5. Схема деформирования  $i$ -го элемента профиля пера лопатки ГТД

Найдя сумму крутящих моментов по спинке и корыту пера лопатки и найдя их разность, можно оценить склонность лопатки к изгибу. Каждый прямоугольный элемент высотой и шириной соответственно  $h_0$  и  $b$  после прокатки принимает размеры,  $h_1$  и  $b$ .

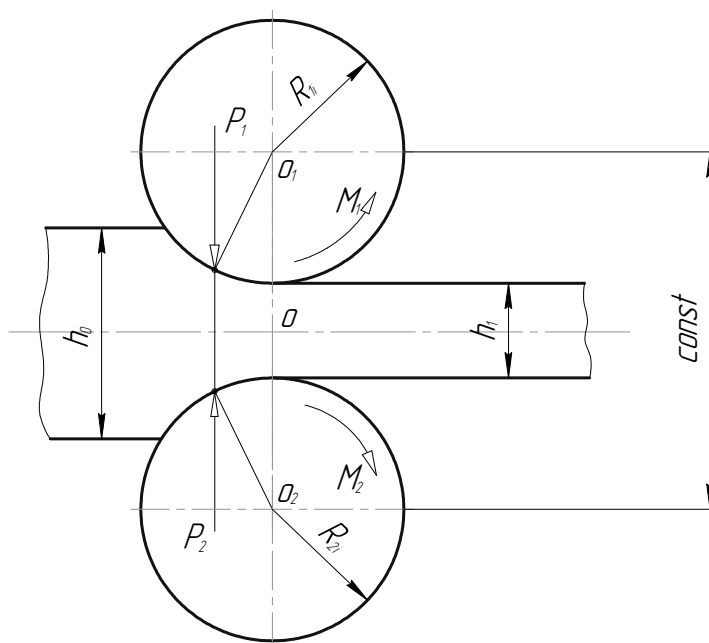


Рисунок 6. Схема прокатки одного элемента пера лопатки ГТД

### Описание очага деформации при вальцевании лопатки

Из далее предложенных результатов расчета вальцевания пера лопатки ГТД видно, что соотношение  $l/h_{cp} > 4$ . Отсюда следует, что в зоне деформации, наблюдается низкий очаг деформации. На низких очагах деформации при  $l/h_{cp} > 4$  на контакте полностью господствуют зоны скольжения, деформацию по высоте можно считать равномерной. Коэффициент трения – важная физическая характеристика процесса. Эпюра нормальных напряжений возрастает к нейтральному сечению, создавая вблизи него большие давления. У А.И. Целикова предложена методика расчета основных параметров вальцовки, при низком очаге деформации

$l$  – длина дуги захвата;

$$h_{cp} = h_0 - hl.$$

Угол захвата при прокатке определим по формуле А.И. Целикова [1, стр. 134]:

$$\alpha = \alpha \cdot (\Delta h/r)^{1/2}.$$

Тогда длину дуги захвата определим:

$$l = (r \cdot \Delta h)^{1/2},$$

где  $r$  – радиус валка;

$\Delta h$  - абсолютное обжатие.

Величину нейтрального угла определим по формуле А.И. Целикова [1, стр. 135]:

$$\gamma = \alpha/2(1 - \alpha/2\mu),$$

где  $\mu$  - коэффициент трения.

При малых значениях  $\Delta h$  и угле захвата примем, что длина проекции дуги захвата равна самой дуге. Тогда координату нейтрального сечения на проекции дуги захвата найдем по формуле А.И. Целикова [1, стр. 135]:

$$N = \sin(\gamma) \cdot R.$$

Определив координату нейтрального сечения и разбив дугу захвата на участки отставания и опережения, определим нормальные напряжения на низком очаге деформации для зоны отставания и для зоны опережения, при соотношении  $l/h_{cp} > 4$ .

Среднее давление металла на валки по формуле А.И. Целикова [1, стр. 138] составит:

$$p_{cp} = \sum p/l \cdot b,$$

Тогда момент на валке можно определить по формуле Баюкова [1, стр. 141]:

$$M=2 \cdot \rho_{cp} \cdot b \cdot R^2 \cdot \mu \cdot (\alpha-2\gamma).$$

По данному алгоритму находим моменты для каждого прямоугольного элемента, а затем определяем суммарные моменты на меньшем валке  $M_1$  и большем валке  $M_2$ . Причем на большем валке получается соответственно и больший момент.

В конце расчёта определяем возможность изгиба заготовки. Из-за разности моментов на валках появляется некоторый изгибающий момент:

$$M_{изг} = |M_2 - M_1|.$$

Именно от его действия может произойти изгиб лопатки, но лишь в том случае если напряжение изгиба будет больше или хотя бы равно пределу текучести материала лопатки.

Напряжение изгиба найдём по формуле:

$$\sigma = M_{изг} / W,$$

где  $W$  – момент сопротивления сечения лопатки изгибу.

В итоге изгиб лопатки произойдёт когда:

$$\sigma_{max} = M_{изг} / W = Z_{max} \cdot M_{изг} / J < \sigma_T / k$$

$k$  – коэффициент запаса ( $k=1,1 - 1,15$ )

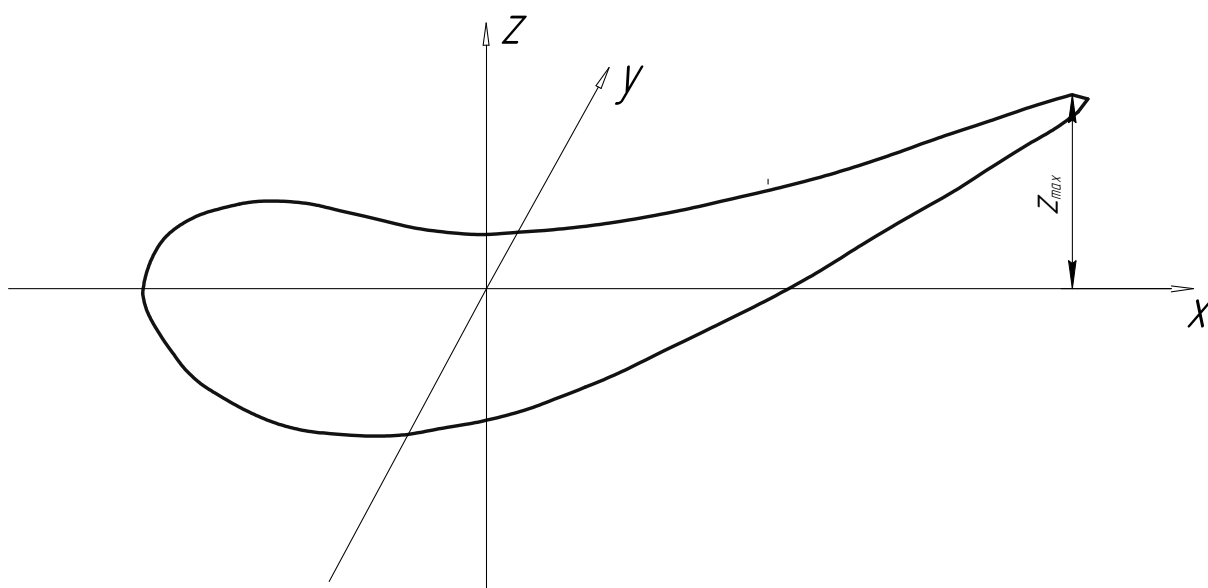


Рисунок 7. Максимальное значение координаты

Таким образом сделаем вывод, что с помощью такой методики расчета вальцевания пера лопатки ГТД, можно заранее просчитать примерный изгиб профиля пера лопатки, изменяя при этом, только значение коэффициента трения на каком-либо валке. При известном угле закручивания профиля пера лопатки, можно определить количество участков. Чем больше угол закрутки пера, тем на большее количество участков он разбивается. В результате данного расчёта мы определили моменты на валках при вальцовке пера лопатки, а также выяснили, в какую сторону будет происходить его изгиб, относительно оси вальцевания, при выходе из валков.

### **Литература**

1. *А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин*, «Технология прокатного производства», М.: Металлургия, 1994.– с.102.
2. *Шефтель Н.И.* «Холодная прокатка листовой стали» , М.: Металлургия, 1966.– с.252.
3. *Шефтель Н.И.* «Производство калиброванной и холоднокатанной стали», М. : Металлургиздат, 1956г – с.210 .
4. *Панасенко Ф.Л.* «Холодная прокатка тонколистовой стали», М .: Высшая школа, 1976. – с.176.
5. *Васильев Я.Д., М.М. Сафьян* «Производство полосовой и листовой стали», М, Высшая школа, 1976. – с.87.
6. *Сафьян М.М., В.Л. Мазур* «Технология процессов прокатки и волочения», М, Высшая школа, 1976. – с.135.

УДК 621.979:621.753.5.001

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ УКРУПНЕННЫХ МАРШРУТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКОЙ**

Сорокина Ольга Сергеевна

*Студентка 6 курса, магистр 2года  
кафедра «Системы пластического деформирования»  
Московский государственный технологический университет «Станкин»*

*Научный руководитель А.М. Смирнов  
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы  
пластического деформирования»*

При проектировании производственных систем важным фактором является автоматизация последовательности выполнения работ, которая . предусматривает наличие как технологической, так и организационной составляющих [1,3].

Интегрированный подход предполагает системное рассмотрение процессов проектирования изделий и технологической подготовки штамповочных комплексов, которые в свою очередь взаимосвязаны с организационным элементом производственной системы изготовления совокупности изделий.

Интегрированный подход предполагает системное рассмотрение процессов проектирования изделий и технологической подготовки штамповочных комплексов, которые в свою очередь взаимосвязаны с организационным элементом производственной системы изготовления совокупности изделий.

Процесс технологической производственной подготовки можно разделить на три этапа.

1 Конструкторско-технологический, который включает анализ свойств деталей и комплектование необходимых совокупностей по технологическим признакам.

2 Разработка операционных технологических процессов.

3 Формирование различных маршрутных технологий изготовления деталей.

Анализ вариантов изготовления листоштампованных деталей может быть достаточно быстро выполнен с использованием системы моделирования организационно-технологических структур цехов и участков листовой штамповки.

Принцип функционирования системы моделирования организационно-технологических структур цехов и участков листовой штамповки иллюстрируется рис.1.



Этап 1 заключается в описании листоштампованных деталей, осуществляемые с использованием некоторых признаков, которые можно разделить на следующие группы:

- конструктивные
  - форма
    - плоские без отверстий;
    - плоские с отверстиями;
    - пространственные гнутые;
    - пространственные, полученные вытяжкой;
    - пространственные, полученные формовкой;
    - пространственные профилированные;
    - детали, имеющие конкретную форму и название (например, пластина активного железа, трансформатора, электрической машины и т.п.).
  - габаритные размеры
    - особомалобагабитные;
    - малобагабитные;
    - среднебагабитные;
    - крупнобагабитные;
    - особокрупнобагабитные.
  - толщина материала
    - особотонколистозые (до 0,4 мм);
    - тонколистозые (0,4 - 4 мм);
    - толстолистозые (свыше 4 мм).
- эксплуатационные (требования к состоянию поверхности, точность изготовления по размерам и формам, материал).
- организационно-технологические, к ним относятся: фонд времени работающих, число рабочих дней в году, число смен, доля времени на наладку, количество запусков в год, выпуск на запчасти, потери на брак, число рабочих, доля вспомогательной площади от общей, стоимость вспомогательных материалов, стоимость аренды, средняя месячная зарплата рабочих, коэффициент доплат, выбирается вид транспорта. Многие из этих данных вводятся однократно, и, как правило, не изменяются, а составляют постоянное число или определенный процент;

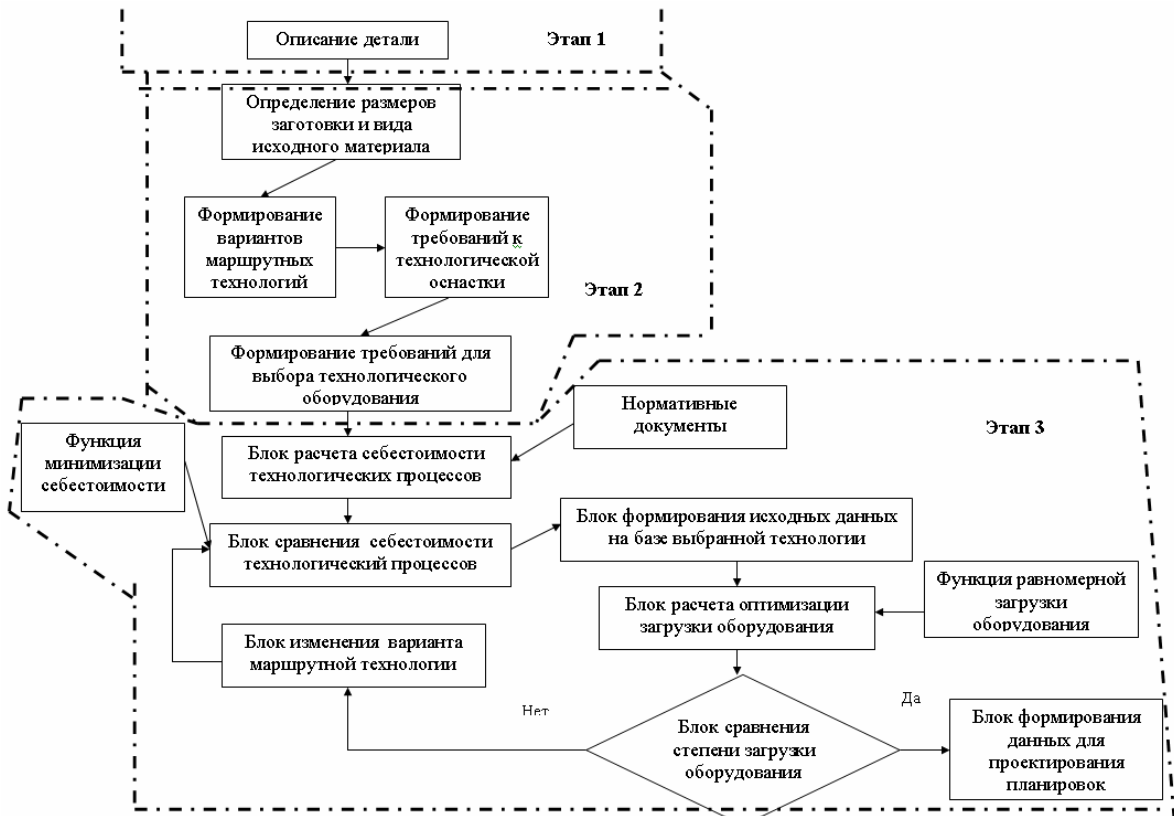


Рис 1. Макроструктура системы моделирования

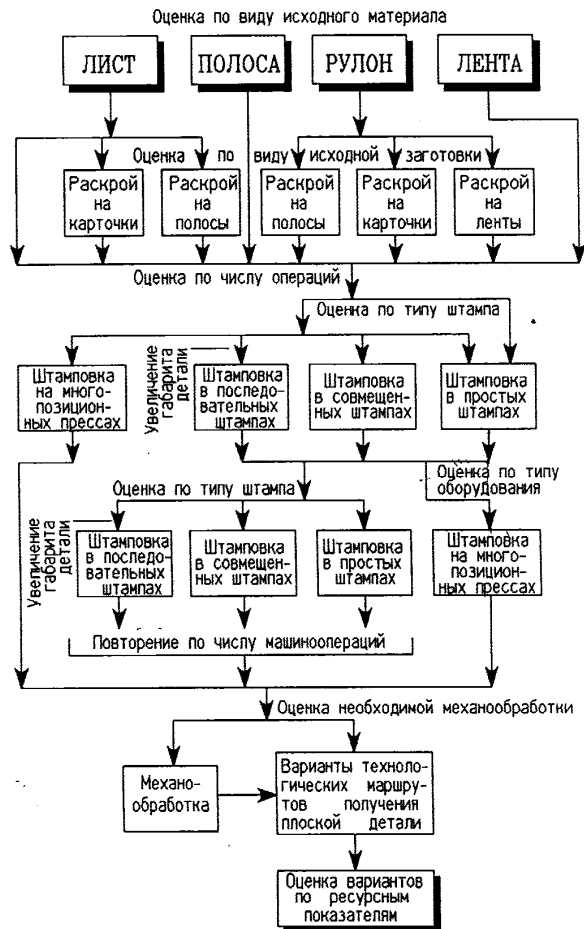


Рис. 2. Алгоритм формирования технологических маршрутов изготовления детали

Этап 2 соответствует формированию возможных вариантов маршрутных технологий и может быть проиллюстрирован рис. 2.. Он включает в следующие модули:

- Модуль «**Определение размеров заготовок и вида исходного материала**». По форме листоштампованные детали делятся на: плоские, гнутые, полученные вытяжкой, пространственные. Такое деление деталей облегчает расчет определения размеров заготовки. Вид материала возможен: лист, полоса, рулон, лента, причем принципиальное отличие рулона от ленты в том, что лента не требует дополнительной обработки (разрезки на ножницах).

- Модуль «**Формирование материалов маршрутной технологии**» на данном этапе происходит ввод технологических операций (гибка, вытяжка, пробивка/вырубка) и выбирается технологическая оснастка (простые, последовательные или совмещенные штампы). Для каждой операции происходит расчет необходимой технологической силы, величины рабочего хода, размеры рабочего пространства прессы, данные показатели позволят рассчитать массу штампа и оценить его стоимость и выбирается вид технологического оборудования, участвующего в технологическом процессе. В зависимости от выбранного вида технологического оборудования автоматически формируются основные данные и параметры оборудования из соответствующей базы.

Этап 3 заключается в расчете технологических себестоимостей процессов изготовления деталей по возможным вариантам и их сравнении на базе целевой функции минимальной себестоимости

$$C = \sum_{r=1}^R \sum_{n \in Nr} \tau_{rn} X_{rn} = \sum_{r=1}^R \sum_{n \in Rn} \tau_{rn} X_{rn} \rightarrow \min \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{n \in Nr} X_{rn} = 1; r = 1, 2, \dots, R \quad (2)$$

$$\sum_{n \in Nr} \tau_{rn} X_{rn} \leq f_n; n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$X_{rn} = 0 \vee 1. \quad (4)$$

где  $R(1..R)$  – перечень номенклатур изготовленных деталей;  $N(1..N)$  – перечень оборудования на участке;  $\tau_{rn}$  – время изготовления  $r$ -го изделия на  $n$ -ом оборудовании;  $C_m$  – себестоимость изготовления  $R$ -го изделия на  $n$ -ом оборудовании;  $f_n$  – фонд времени работы  $n$ -го оборудования;  $Nr$  – совокупность номеров оборудования, на котором можно изготовить  $r$ -ое изделие ( $n \in Nr, Nr \in N$ );  $Rn$  – совокупность номеров тех изделий, которые по техническим условиям можно изготовить на  $n$ -ом оборудовании' ( $r \in Rn, Rn \in R$ );  $X_{rn}$  – переменная которая равна 1, если  $r$ -е изделие изготавливают на  $n$ -ом оборудовании и  $X$  равна 0, если  $r$ -ое изделие не изготавливают на  $n$ -ом оборудовании.

Условие (2) обозначает, что при изготовлении  $r$ -го изделия на  $n$ -ом оборудовании всю партию необходимо изготовить на этом оборудовании (это требование цело численности). В случае если программу какого-либо

изделия необходимо разделить на две или более партии для того, чтобы не превышать годовой фонд времени, каждую партию следует рассматривать как отдельное изделие. Кроме того, это условие означает, что должны быть рассмотрены все изделия заданной номенклатуры.

$$\sum_1^R \sum_{n \in Nr} X_m = R \quad (5)$$

Условие (3) ограничивает суммарное время изготовления всех изделий на данном оборудовании в соответствии с нормативным действительным фондом времени  $f_n$  его работы, а условие (4) исключает возможность одного и того же изделия на различном оборудовании.

Расчет оптимизации загрузки оборудования базируется на целевой функции равномерной загрузки оборудования

$$Z = \sum_1^N \left\{ \left( \sum_{r \in Rn} \tau_m X_m \right) / f_n (1/N) \sum_1^N \left( \left( \sum_{r \in Rn} \tau_m X_m \right) / f_n \right) \right\}^2 \quad (6)$$

при вышеперечисленных ограничениях (2)-(4).

Совместное использование целевых функций позволяет выбрать наиболее рациональную маршрутную технологию.

Для условий небольших объемов производства при ограниченных номенклатурах и типом оборудования данная система может быть реализована на базе MS Excel. Она включает:

1. Модуль «**Формирование исходных данных**» предназначен для формирования данных по деталям-представителям, выбранном технологическом оборудовании, технологической оснастке, организационно-технологической структуре проектируемого производства.

2. Модуль «**Программа**». В данном модуле рассчитывается программа выпуска и запуска по деталям

3. Модуль «**Технологическое оборудование**». В нем определяется количество оборудования и коэффициент загрузки оборудования по моделям и участку, трудоемкость наладочных работ по видам оборудования и по участку.

4. Модуль «**Численность работающих**» предназначен для расчета численности всех категорий работающих с разделением по сменам и заработной платы работающих.

• 5. Модуль «**Физические ресурсы**». В нем рассчитывается масса годового запуска по деталям определяется годовая масса отходов по деталям, деталям-представителям, участку по группам материала (черные металлы, цветные металлы, неметаллы) и виду (лист, рулон и т.д.). Выявляется годовой расход штампов и приспособлений и их количество по штампооперациям и на участке, а также затраты на их приобретение. Определяется годовой расход и затраты на все виды энергоносителей и вспомогательные материалы

• 6. Модуль «**Складское хозяйство**» предназначен для расчета площадей и затрат на складское хозяйство.

7. Модуль «**Площади цеха**». Определяются площади по группам оборудования, по участку и исходные размеры производственного подразделения

В среде EXCEL MS разработано информационное обеспечение по нормативным показателям, параметрам технологического оборудования

Выводы:

1. Разработана методика формирования укрупненных вариантов изготовления листоштампованных деталей в условиях ограниченной номенклатуры изделий и критериям принятия решений.

2. Предложен вариант реализации алгоритм расчета оптимальной загрузки оборудования цеха (участка) листоштамповочного производства, позволяющий выбрать рациональный вариант маршрутной технологии с использованием среды Exel MS

### **Литература**

1. *Григорьева Л.Л., Клепикова Ю.М.* Опыт создания гибких технологических систем холодноштамповочного производства. – Ленинград.: ЛДНТП, 1989. – 88 с.
2. *Зимин В.В., Семенов И.Е., Смирнов А.М.* «Проектирование холодноштамповочных цехов автоматизированных производств»: Учеб. Пособие. -М.; Мосстанкин, 1988, -83с.
3. *Егоров М.Е.* «Основы проектирования машиностроительных заводов», - М.; Высшая школа, 1969. – с 480.

УДК 621.777

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Сосенушкин Александр Евгеньевич

*Студент 3 курса*

*Кафедра «Системы пластического деформирования»*

*Московский государственный технологический университет «Станкин»*

Научный руководитель: Л.М. Овечкин

*Младший научный сотрудник кафедры «Системы пластического деформирования»*

На современном уровне развития машиностроения предъявляются повышенные требования к применяемым в конструкциях материалам, а в частности, к легким и прочным металлам и сплавам. Существует потребность в металлах и сплавах с высоким комплексом физико-механических свойств с целью оптимизации и усовершенствования конструкций машин, уменьшения массы изделий и затрат энергии, повышения срока службы устройств. Поэтому получение металлов и сплавов, обладающих наноструктурой, имеет существенное значение при создании ряда новых изделий космической, электротехнической и медицинской техники [1].

В настоящее время разработано и развивается несколько методов получения материалов с ультрамелкозернистой структурой. Объемные ультрамелкозернистые материалы с размером зерен около 100 нм возможно получать методами порошковой технологии, включая компактирование прессованием и спекание из тонкодисперсных порошков. Методы порошковой металлургии имеют ряд недостатков, среди которых: загрязнение образцов при подготовке порошков или их консолидации, сохранение некоторой остаточной пористости при компактировании, увеличение геометрических размеров получаемых образцов.

Данных недостатков удастся избежать при использовании методов интенсивной пластической деформации (ИПД), заключающихся в деформировании с большими степенями деформации (логарифмическая деформация  $\epsilon=4...7$ ) при относительно низких температурах порядка  $(0,3-0,4)T_{пл}$  в условиях высоких приложенных давлений.

Как показывает обзор литературных источников, в частности [1-4], получаемые рассматриваемым методом интенсивной пластической деформации конструкционные металлы и сплавы (наноматериалы) приобретают свойства, не типичные для обычных металлов: прочность при достаточно высоком уровне пластичности, твердость, износостойкость, низкотемпературная и высокоскоростная сверхпластичностью, повышенное

сопротивление малоцикловой и многоцикловой усталости, высокодемпфирующие свойства.

Равноканальное угловое прессование, благодаря способности формирования однородной ультрамелкозернистой структуры и сравнительной простоты реализации, является перспективным методом получения заготовок-полуфабрикатов с высоким уровнем физико-механических свойств. При равноканальном угловом прессовании (рис. 1) заготовка продавливается через пересекающиеся под углом  $2\varphi=90-150^\circ$  каналы равного поперечного сечения и деформируется по схеме простого сдвига.

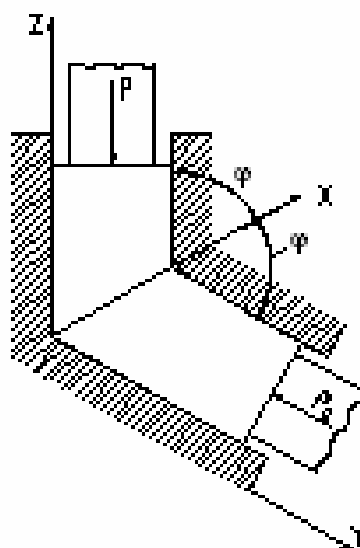


Рис.1. Схема равноканального углового прессования (РКУП)

Основными параметрами РКУП согласно [4] являются: угол пересечения каналов, температура, число деформационных проходов, маршрут прессования, который зависит от вращения образцов вокруг своей оси при повторяющейся деформации. Формирование структур существенно зависит от схемы осуществления РКУП. Применяют три основных маршрута. Первый предполагает повторное прессование образца без вращения. Во втором маршруте образцы вращаются на  $90^\circ$  вокруг своей оси между проходами, и на  $180^\circ$  в маршруте 3 [4].

Выполненное компьютерное моделирование в среде QFORM 2D процесса равноканального углового прессования заготовки из алюминиевого сплава Д16, позволило установить, что геометрия каналов влияет на энергосиловые параметры процесса РКУП. Химический состав исследуемого сплава приведен в таблице 1.

**Таблица 1. Химический состав в % содержания легирующих элементов в сплаве Д16, ГОСТ 4784-74**

Легирующий элемент		
Mg	Mn	Cu
1,50	0,60	4,35

Рис.2 иллюстрирует сетку конечных элементов на промежуточной стадии прессования (а), искажение лагранжевых линий (б) и направления векторов скоростей деформаций (в).

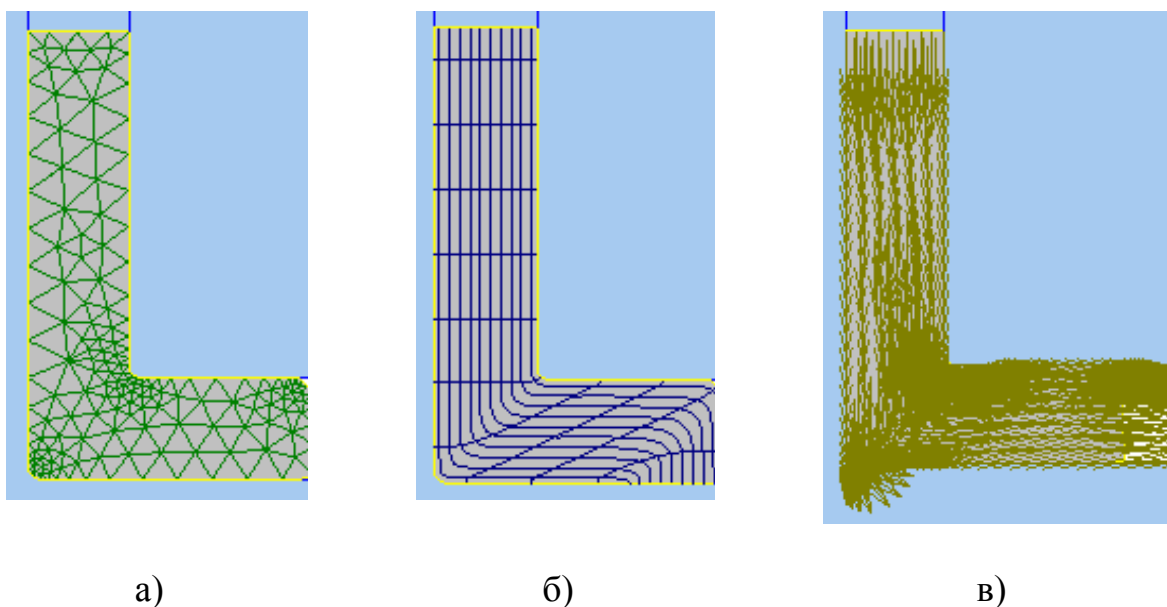
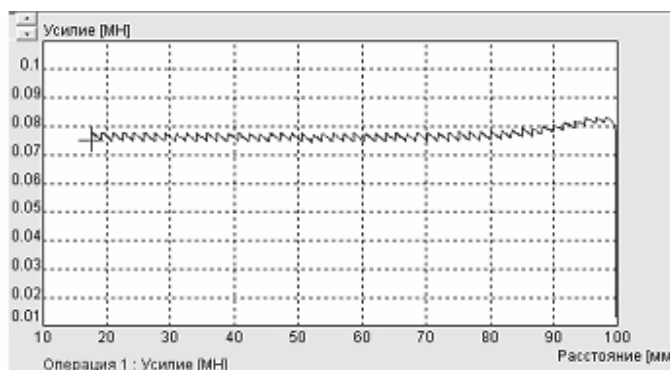


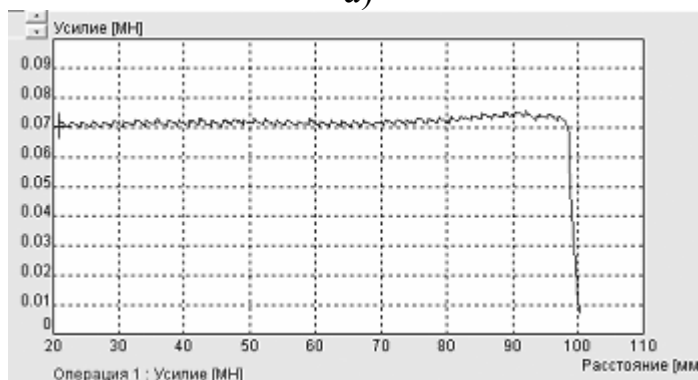
Рис. 2. Моделирование РКУП: а) - сетка конечных элементов, б) - лагранжевые линии, в) – векторы скоростей деформаций

Анализ процесса деформирования заготовки из сплава Д16 через каналы прямоугольного сечения размером 16×16 мм, позволил получить зависимость силы деформирования от радиуса сопряжения каналов (рис. 3).

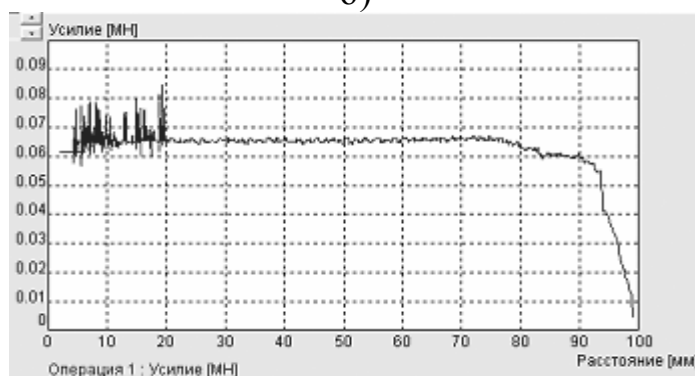




а)



б)



в)

Рис.3. Зависимость силы деформирования от радиуса сопряжения каналов: а) –  $R=2\text{мм}$ ; б) –  $R=5\text{мм}$ ; в) –  $R=10\text{мм}$ .

Анализируя полученные зависимости установлено, что радиус сопряжения 2 мм оптимален с точки зрения как величины силы деформирования, так и по наиболее благоприятной кинематике течения.

Предложена универсальная модульная конструкция матричного блока штампа, что способствует унификации инструмента для РКУП (рис.4,а). Для изменения степени деформации заготовок требуется минимальная переналадка путем замены ограниченного количества вставок, образующих пересекающиеся каналы. Вышеуказанный результат достигается тем, что устройство для обработки металлов давлением содержит бандаж с отверстием и запрессованной в него разборной матрицей, смещенной относительно бандажа на величину эксцентриситета, которая не превышает ширины рабочего канала. Разборная матрица состоит из сменных и универсальных вставок, фиксируемых с помощью штифтов между

плоскостями универсальных полуматриц. Наличие разъема вставок по высоте позволяет ограничить число вставок, заменяемых при переналадке устройства на другую степень деформации. Описанное устройство для РКУП защищено патентом РФ [5].

В ходе проведенных в лаборатории кафедры СПД экспериментов отлажена технология РКУП на заготовках из свинца в холодном состоянии по второму маршруту (рис. 4, б,в). Определены рациональные конструктивные решения и условия трения, связанные с подбором качественной технологической смазки для уменьшения искажений торцевых частей заготовок.



а)



б)



в)

Рис.4. РКУП заготовок из свинца. а) – штамповая оснастка для РКУП; б) - заготовка после одного цикла прессования; в) - заготовка после двух проходов РКУП.

### Литература

1. *Валиев Р.З., Александров Н.В.* Наноструктурные наноматериалы, полученные интенсивной пластической деформацией.- М.: Логос, 2000. –272 с.
2. *Рааб Г.И., Семенов В.И., Савельева Н.В., Муставина Э.Ф.* Влияние термомеханической обработки на структуру и коррозионные свойства углеродистых сталей. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2008. – №12. – С. 34-36.
3. *Лякишев Н.П.* Конструкционные наноматериалы. //Технология легких сплавов.- 2006. - №3. - с. 40-49.
4. *Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др.* Процессы пластического структурообразования металлов. - Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.
5. *Сосенушкин А.Е.* Устройство для равноканального углового прессования/ Патент №86507 на полезную модель./ Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Артес А.Э. и др. – Бюлл. №25. – 2009.

УДК 621.791

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОСНАСТКИ ДЛЯ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Аборкин Артемий Витальевич, Захаров Александр Андреевич

*Студенты, аспиранты*

*Кафедра ТМС Владимирский Государственный Университет*

*Научный руководитель: Белевич А.В.*

*Д.т.н., профессор кафедры ТМС Владимирский Государственный Университет*

В настоящей работе ставится задача прогнозирования долговечности рабочей поверхности оснастки для равноканального углового прессования (РКУП).

В связи с отсутствием точных аналитических решений для определения параметров напряженно-деформированного состояния и долговечности оснастки, а также невозможности или дороговизны проведения экспериментальных исследований, преобладающими методами исследования являются численные решения.

Обеспечение требуемой долговечности штамповой оснастки на стадии проектирования является актуальной проблемой.

Сложность решения данной задачи связана с разнообразием конструктивных форм оснастки и высокой трудоемкостью вычислительных процедур, не позволяющих достаточно подробно проанализировать кинетику упруго-пластического деформирования.

Ранее авторами проведены исследования по изучению влияния геометрических параметров оснастки на напряженно-деформированное состояние заготовки при РКУП. Однако при проведении исследований не проведена оценка циклической долговечности рабочей поверхности оснастки.

Для решения этой проблемы, в Владимирском государственном университете разработана расчетная методика прогнозирования долговечности рабочей поверхности оснастки работающей в условиях циклических термосиловых нагрузок.

Разработанная методика реализована на основе локально-деформационного подхода и статистического моделирования разброса физико-механических свойств материала по алгоритму метода Монте-Карло.

Метод локальной деформации рассматривает изменение локального напряжения  $\sigma$  и деформации  $\varepsilon$  в точке концентрации напряжений.

Уравнение кривой усталости в деформационном подходе имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^b + \varepsilon_f^{\frac{c}{b}} (2N)^c, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  – амплитудное значение деформации;  $N$  – число циклов до зарождения трещины;  $E$  – модуль упругости материала;  $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$ ,  $b$ ,  $c$  – постоянные материала.

В разработанной методике расчет изменения параметров напряженно-деформированного состояния оснастки за цикл нагружения осуществляется с использованием метода конечных элементов.

Для снижения трудоемкости расчетов используется модифицированная зависимость Нейбера в виде:

$$\sigma_r = \sigma^m (\sigma + E\varepsilon_{пл})^{1-m}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{пл}$  – пластическая деформация;  $\sigma$  – действительное напряжение в зоне концентрации;  $\sigma_r$  – напряжение в зоне концентрации, найденное в предположении упругого деформирования во всем диапазоне изменения деформаций;  $m$  – показатель, зависящий от условий нагружения, принимает, значения от 0 до 1.

Использование зависимости (2) позволяет связать амплитуду деформаций, полученную в результате "упругого" расчета напряженно-деформированного состояния оснастки, с действительным значением суммарной амплитуды деформаций, включающей упругую и пластическую составляющие, и определить значения этих составляющих.

По результатам расчета параметров напряженно-деформированного состояния определяют зоны локальной концентрации напряжений, где наиболее вероятно появление усталостных трещин. Для этих зон выполняется расчет амплитуды напряжений.

Переход к одноосному напряженному состоянию осуществляется на основании гипотезы Губера–Мизеса–Генки.

При асимметричном циклическом нагружении, когда превалируют растягивающие напряжения, амплитуда цикла корректируется коэффициентом влияния асимметрии цикла.

Величины параметров  $E$ ,  $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$ , входящих в уравнение (1), в большой степени зависят от температуры. Поэтому, при расчете, в модель долговечности вводятся значения данных параметров, соответствующие эффективной температуре цикла, которая определяется выражением:

$$T_{эфф} = \frac{3T_{max} + T_{min}}{4}, \quad (3)$$

где  $T_{max}$  – максимальная температура цикла;  $T_{min}$  – минимальная температура цикла.

В работах С. Мэнсона и других авторов показано, что параметры  $c$  и  $b$ , входящие в уравнение (1), находятся в определенной взаимосвязи и для множества материалов одного класса, например сталей, имеют одинаковые значения. В таком случае, в вероятностном расчете на множестве плавок материала данной марки, параметры  $c$  и  $b$  можно рассматривать как детерминированные величины.

Данные о рассеянии и взаимной связи параметров  $\sigma_f$  и  $\varepsilon_f$  отсутствуют. Выполнены детерминированные расчеты, в которых варьировали значения этих параметров. Результаты расчетов показали существенное влияние на изменение долговечности вариации параметра  $\sigma_f$ , влияние же вариации  $\varepsilon_f$  незначительно. Так, вариация  $\sigma_f$  в пределах  $\pm 5\%$  изменяет долговечность на 100% и более, такая же вариация  $\varepsilon_f$  – не более чем на 10%.

С учетом приведенных результатов, возможной вариацией параметра  $\varepsilon_f$  в вероятностных расчетах можно пренебречь. В таком случае, рассеяние долговечности в параллельных опытах на множестве плавок объясняется в основном рассеянием предела циклической долговечности  $\sigma_f$ . Вероятностные расчеты выполнены на основе уравнения (1) в форме вычислительного эксперимента с учетом рассеяния  $\sigma_f$ .

Порядок вероятностного расчета следующий:

1) С использованием алгоритма метода Монте-Карло моделировали пять значений предела прочности  $\sigma_b$ , как случайной величины из интервала разброса  $\sigma_b$ .

2) По полученным значениям  $\sigma_b$  вычисляли соответствующие им значения  $\sigma_f$  по формуле:

$$\sigma_f = 1,75\sigma_b. \quad (5)$$

3) Далее проводили статистическую обработку результатов расчета долговечности.

При статистической обработке, в соответствии с рекомендациями работы [1] принято логарифмически нормальное распределение долговечности. Величину доверительного интервала для среднего значения долговечности  $N$  вычисляли с заданной вероятностью 0,95.

Указанная методика реализована с использованием программного комплекса QForm 3D, основанного на методе конечных элементов и математической среды MathCAD (математическая система, предназначенная для научно-технических вычислений), что позволяет, варьируя значениями параметров цикла нагружения, геометрической формой оснастки, а также механическими свойствами металла, определять долговечность рабочей поверхности оснастки на этапе проектирования.

Структурная схема алгоритма методики прогнозирования долговечности рабочей поверхности оснастки для РКУП представлена на рис. 1.

Расчетный анализ напряжений и расчет параметров, характеризующих долговечность оснастки, выполняли в виде нескольких последовательных этапов.

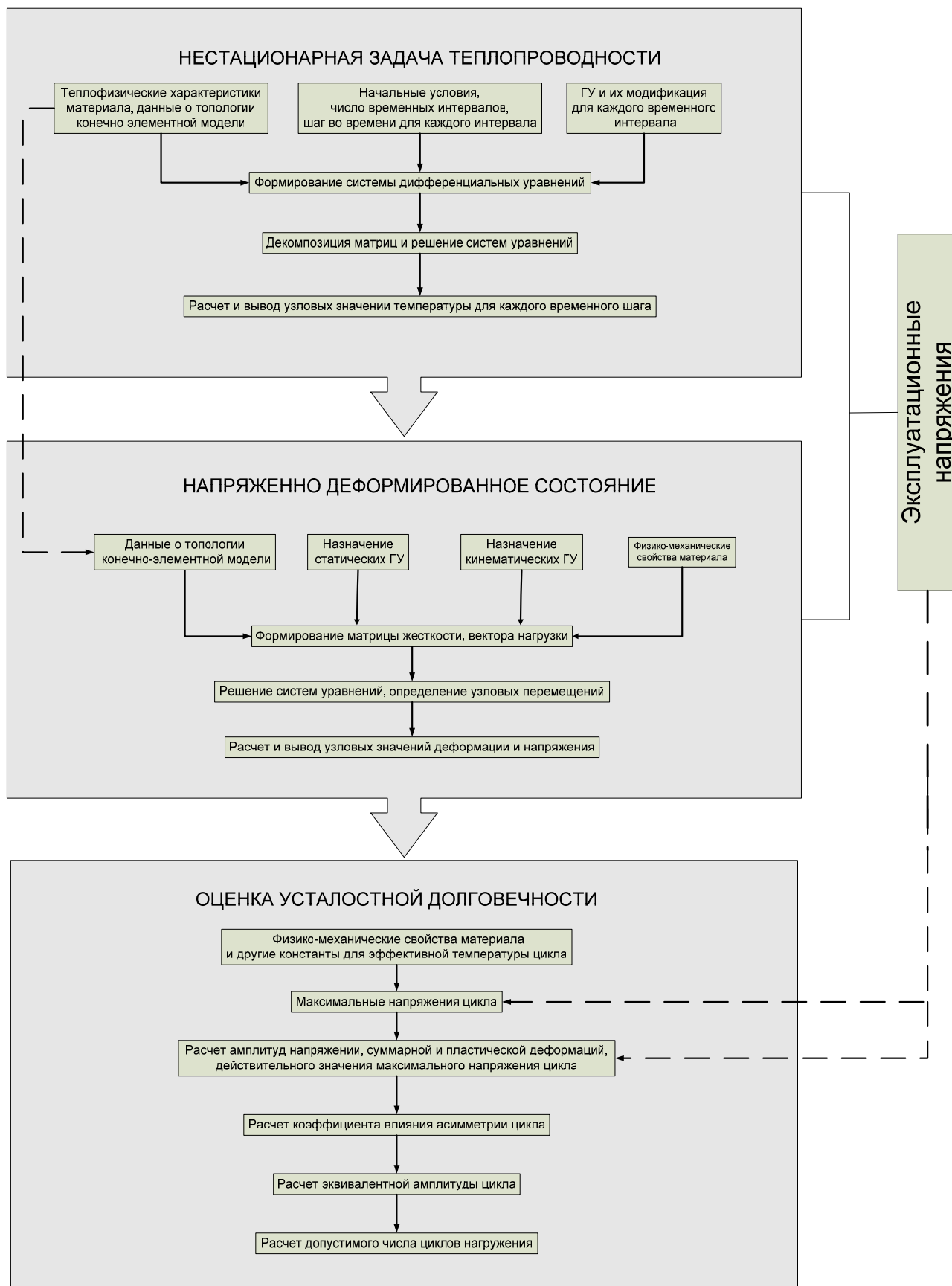


Рис.1. Блок-схема алгоритма прогнозирования долговечности оснастки РКУП

1 этап. Расчет напряжений без учета трения между рабочей поверхностью оснастки и заготовкой при различных геометрических параметрах оснастки.

2 этап. Сравнительный анализ напряжений и определения варианта оснастки с наибольшим уровнем напряжений.

3 этап. Расчет напряжений с учетом трения между рабочей поверхностью оснастки и заготовкой для варианта оснастки с наибольшим уровнем напряжений.

4 этап. Расчетная оценка долговечности рабочей поверхности оснастки для РКУП.

Моделирование процесса РКУП проводили в пакете QForm 3D в соответствии со схемой, которая представлена на рис 2а.

Расчеты первого этапа выполнены для двух вариантов исполнения оснастки с углом пересечения каналов ( $\Phi$ )  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . Для каждого из вариантов оснастки проведены расчеты с изменением радиуса скругления ( $r$ ) каналов в диапазоне 1 – 3 мм. Расчеты выполнены для материала заготовки Д16, температура заготовки  $380^\circ\text{C}$ , материал инструмента 5ХНМ, температура инструмента  $250^\circ\text{C}$ , скорость движения пуансона 0,1 м/с, максимальное усилие пресса 80 т, диаметр заготовки 30 мм.

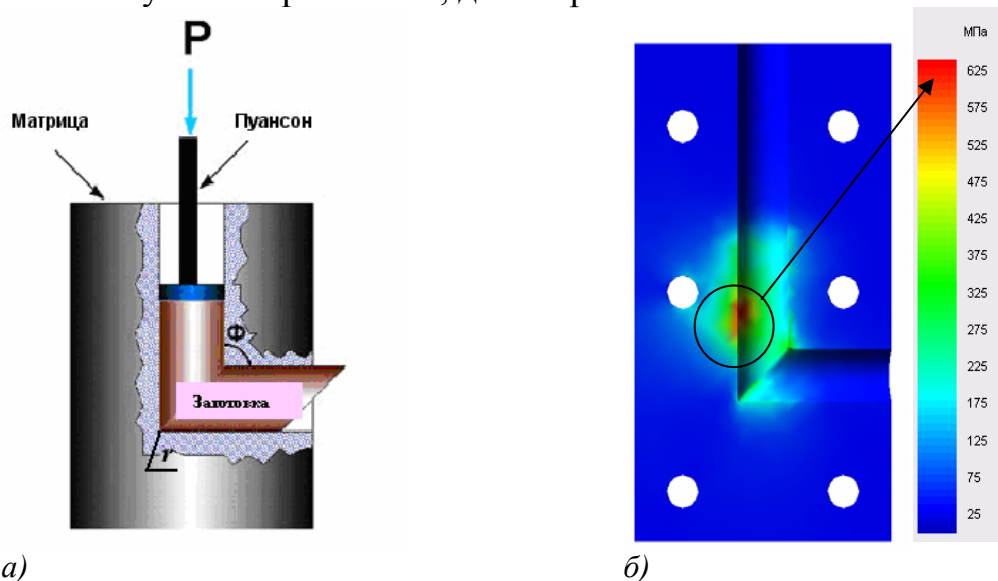


Рис. 2. Схема РКУП (а), картина распределения эквивалентных напряжений в сечении оснастки (б)

Моделирование РКУП в пакете QForm 3D позволило получить информацию о кинетике изменения параметров напряженно-деформированного состояния заготовки и инструмента в процессе выдавливания.

На втором этапе, в результате сравнительного анализа расчетных напряжений для различных вариантов исполнения оснастки установлено, что наибольшие растягивающие напряжения возникают на стенке вертикального канала в месте указанном на рис. 2б. Полученные данные хорошо согласуются с результатами, представленными в работе [2].



На рис. 2б представлена картина распределения расчетных эквивалентных напряжений в сечении оснастки. Максимальные напряжения в процессе РКУП достигаются в выделенной зоне, их величина составляет 600 МПа. Отмеченная зона концентрации напряжений характерна для всех рассмотренных вариантов исполнения оснастки.

Расчеты показали что напряжения, возникающие на рабочей поверхности оснастки с углом пересечения каналов  $90^\circ$  в среднем в 2 раза больше напряжений возникающих в оснастке с  $\Phi = 120^\circ$ .

На основании расчетов установлено, что наибольшие напряжения на рабочей поверхности возникают в варианте оснастки с параметрами  $\Phi = 90^\circ$ ,  $r = 1$  мм.

На третьем этапе для данного варианта конструкции оснастки ( $\Phi = 90^\circ$ ,  $r = 1$  мм) выполнен расчет параметров напряженно-деформированного состояния с учетом трения между рабочей поверхностью оснастки и заготовкой.

Сравнительный анализ результатов расчетов, показал, что наличие трения увеличивает величину напряжений в 2 раза по сравнению с расчетом без учета трения.

На четвертом этапе исследований проведена расчетная оценка долговечности оснастки с параметрами  $\Phi = 90^\circ$ ,  $r = 1$  мм. для вариантов расчета с учетом и без учета трения.

Расчеты показали, что величина долговечности рабочей поверхности оснастки, полученная в предположении отсутствия трения на два порядка больше долговечности при наличии трения.

Таким образом, установлено, что трение в значительной мере влияет на долговечность рабочей поверхности оснастки для РКУП.

Данное обстоятельство позволяет говорить о том, что при разработке технологических процессов РКУП необходимо уделять особое внимание смазке рабочих поверхностей оснастки для снижения трения.

В настоящее время авторами проводятся экспериментальные исследования, направленные на снижение величины трения при прессовании.

## Литература

1. Надежность в машиностроении: Справочник 1 / Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – Спб.: Политехника, 1992. – 719 с.: ил.
2. *A. V. Belevich, D.M. Babin* «Computer simulation of kinematics of plastic flow and the deformed condition of metal at processes equal-channel angular pressing»/ *Materials Science forum/ Trans Tech Publications in Switzerland/Vols. 584-586 (2008) pp 1077-1082.*

УДК 658.011.56:621.979.001.57

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПНЕВМОПРИВОДОВ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ**

Володина Ольга Анатольевна

*Студентка 5 курса, магистр 1 года,  
Кафедра «Системы пластического деформирования»  
Московский Государственный Университет «СТАНКИН»*

*Научный руководитель: А.М.Смирнов,  
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Системы пластического деформирования»*

Пневматические приводы получили широкое применение при автоматизации производственных процессов в общем машиностроении и станкостроении, в транспортном и полиграфическом машиностроении, в литейном и кузнечном производстве[1,2].

Пневмоустройства используют в качестве приводов зажимных и транспортирующих механизмов. В первом случае привод называется силовым и используется, например, в робототехнике в схватах манипуляторов, во втором случае привод называется кинематическим. По сравнению с другими индивидуальными приводами широкое применение пневмоприводов объясняется такими их преимуществами как, надёжность функционирования, простота конструкции, сравнительная лёгкость их эксплуатации и ремонта. Они относительно дешёвы и являются гибким средством при автоматизации производственных процессов, обеспечивая воспроизведение поступательного движения без каких-либо передаточных механизмов.

Минусы связаны с ограничениями по создаваемым технологическим силам.

В кузнечно-штамповочном производстве пневматические приводы работают с высокими скоростями и при этом должны обеспечивать высокую точность позиционирования.

Одним из важных вопросов, решаемых при проектировании пневмоприводов (особенно приводов перемещения) является гашение скорости к концу хода. Это обеспечивается применением резиновых прокладок или пружин, воспринимающих удар в конце хода поршня, или повышением давления в полости противодействия так же в конце хода. Но применение прокладок и пружин приводит к снижению точности позиционирования заготовки из-за отскока поршня и связанных с ним масс при упругом ударе. Поэтому в быстродействующих приводах для гашения скорости используют метод повышения давления, который может быть осуществлен двумя способами:

- использованием тормозных золотников;
- использованием дроссельных устройств (внутренних тормозных устройств).

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема привода, которая включает силовой цилиндр и аппаратуру управления.

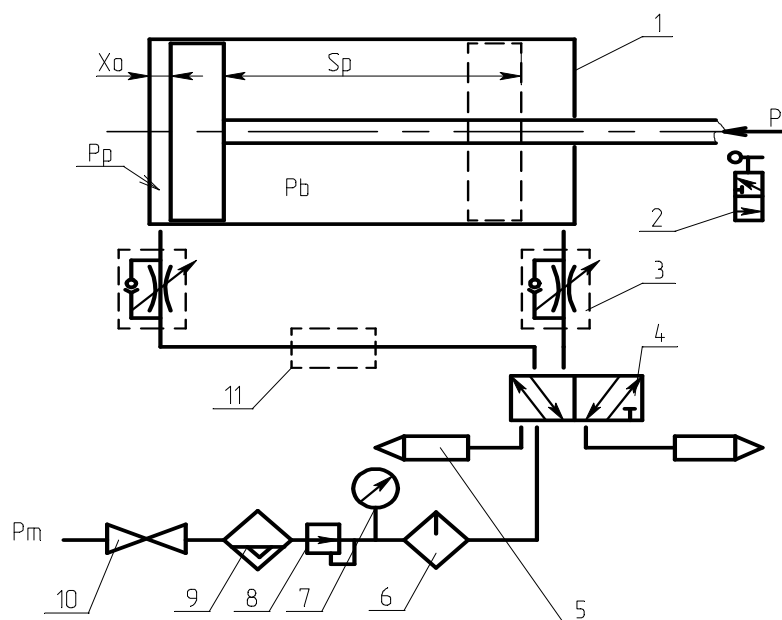


Рис.1 Структурная схема пневмопривода (1 - цилиндр; 2 – конечный выключатель; 3 – дроссель; 4 – воздухораспределитель; 5 – глушитель; 6 – маслораспылитель; 7 – манометр; 8 – регулятор давления; 9 – маслораспылитель; 10 – кран; 11 – тормозной золотник )

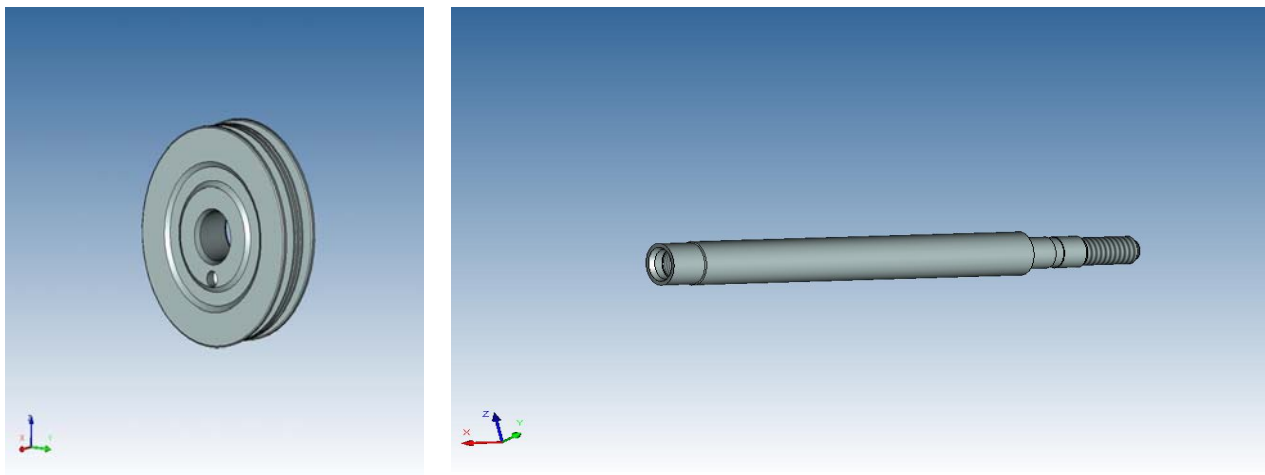
Высокая производительность автоматизированного кузнечно-штамповочного оборудования предъявляет повышенные требования к быстродействию приводов. Поэтому применяемые методы приближенных расчетов времени цикла не всегда удовлетворяют требования заказчика. Кроме того, на точность расчета оказывает влияние и достоверность сведений о фактических размерах и массах подвижных частей.

В задачу настоящей работы входило:

1. Разработка алгоритма расчёта и проектирования пневмопривода.
2. Подготовка программы на языке C++ по расчёту времени цикла работы пневмопривода с учетом фактических размеров силовых цилиндров и параметров аппаратуры управления.

Для анализа динамики привода с учетом фактических физических характеристик деталей пневмоцилиндра были использованы параметрические 3D-модели деталей, примеры которых приведены на рис.2. В качестве графического пакета использовался TFLEX CAD 3D. Разработка параметрических моделей деталей тормоза основывалась на известных методиках проектировочных и проверочных расчетов деталей [1,2]. Также использовались эмпирические зависимости, полученные на основании

анализа существующих конструкций пневматических цилиндров, на базе которых были созданы 3D модели деталей и сборочного узла.



а)

б)

Рис.2 Параметрические 3D-модели деталей «поршень» (а) и «шток» (б)

Алгоритм расчёта и проектирования пневмопривода включает следующие модули:

- Модуль «формирование исходных данных» (разработка системы объекта; уточнение структуры элементов объекта в соответствии с обобщенной скелетной схемой, показанной на рис.3. и определение взаимосвязи между элементами структуры объекта создание необходимой базы данных стандартных элементов).
- Модуль « расчёт конструктивных параметров» (определение расчётного диаметра цилиндра, расчёт размеров трубопроводов и проходных сечений отверстий подводящей и выхлопной магистралей)
- Модуль « динамические расчёты» (определение параметров движения, давления в рабочей полости и полости подпора, сил активного сопротивления, составляющих времени цикла и построение графиков переходных процессов)
- Модуль « формирование исходных данных для создания рабочих чертежей» (в редактор переменных рабочих чертежей и сборочного узла передаются уточненные параметры системы пневмопривода, а также уточненная схема привода)

### Скелет структурной схемы пневмопривода

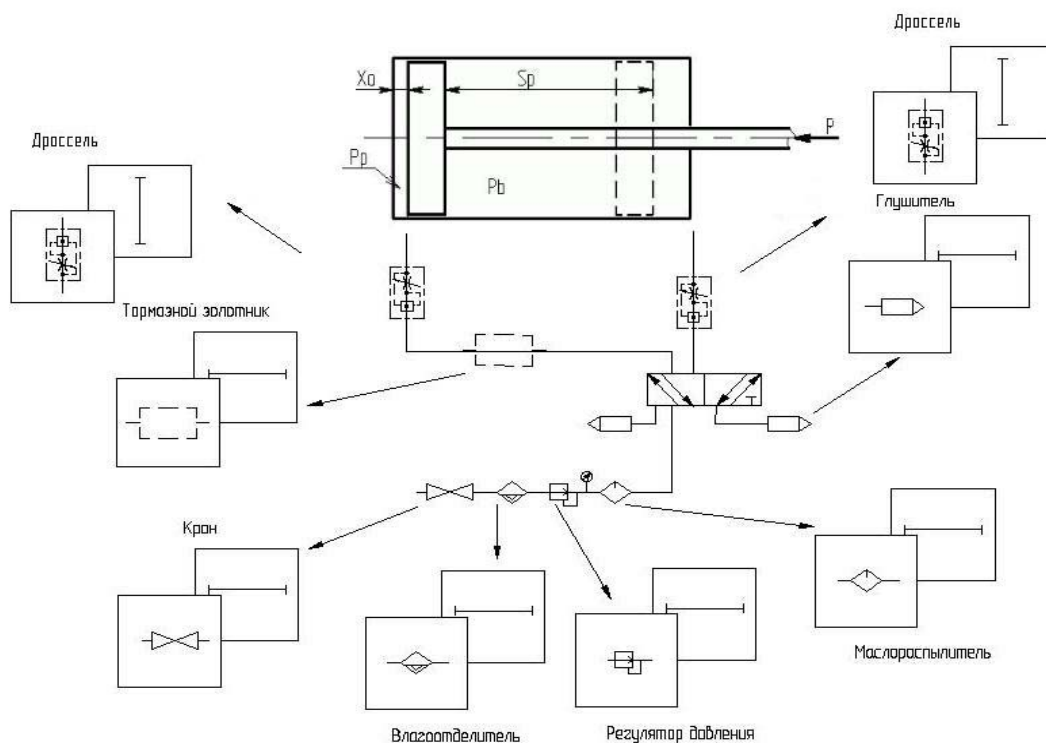


Рис.3. Обобщенная скелетная схема системы управления приводом

При разработке математической модели были использованы следующие зависимости:

1. Основным параметром исполнительного устройства привода является диаметр силового цилиндра, который либо задается проектантом, либо определяется в соответствии с практическими рекомендациями:

$$d_u = \sqrt{\frac{4P_T}{\pi\eta p_p}} \quad (1),$$

где  $P_T$  – нагрузка, приведенная к штоку поршня;  $\eta$  – конструктивный параметр, соответствующий работе привода в оптимальном режиме;  $p_p$  – давление воздуха в наполнительной магистрали.

2. Диаметр проходного сечения трубопроводов также либо задается проектантом, либо рассчитывается с учетом принятых ограничений по скорости перемещения выходного звена исполнительного механизма и времени движения:

$$d_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{u_o d_u^2}{10^4 \mu_a}} \quad (2),$$

где  $\mu_a$  – коэффициент расхода, принимаемый на этапе предварительных расчетов равным 0,25–0,30;

$u_o$  – скорость движения подвижных частей, определяемая из выражения:

$$u_o = \frac{(1 + k_1) S_p}{t_p} \quad (3),$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий условия разгона и торможения;

$S_p$  – рабочий ход поршня;

$t_p$  – ограничение по времени, обусловленное частотой ходов кузнечно-штамповочной машины.

По размеру проходного сечения подбирается конкретная модель элементов аппаратуры управления.

3. Динамические расчёты проводят с использованием уравнений теплового баланса в рабочей полости (4) и полости подпора (5) и обобщенного уравнения движения (6).

$$P_{pi} = P_{pi-1} + \frac{k}{\frac{W_{op}}{F_p} + x_{i-1}} \left( \frac{G_{pi} R T_p}{F_p} + P_{pi-1} u_{i-1} \right) \Delta t \quad (4),$$

где  $P_{pi-1}$  – значение текущего давления в рабочей полости;  $k$  – показатель адиабаты;  $W_{op}$  – начальный объем рабочей полости;  $F_p$  – активная площадь поршня со стороны рабочей полости;  $R$  – газовая постоянная;  $T_p$  – температура воздуха в рабочей полости;  $u_{i-1}$  – скорость движения подвижных частей;  $\Delta t$  – принятый шаг приращения времени

при вычислительных процессах;  $x_{i-1}$  – текущая координата положения поршня;  $G_{pi}$  – расход воздуха, поступающего в рабочую полость.

$$P_{ai} = P_{ai-1} + \frac{k}{\frac{W_{oa}}{F_a} - x_{i-1}} \left( P_{ai-1} u_{i-1} - \frac{G_{ai} R T_a}{F_a} \right) \Delta t \quad (5),$$

где  $P_{ai-1}$  – значение текущего давления в полости подпора;  $W_{\infty}$  – начальный объем полости подпора;  $F_a$  – активная площадь поршня со стороны полости подпора;  $G_a$  – расход воздуха, выходящего из полости подпора;  $T_a$  – температура воздуха в полости подпора.

$$a_i = \frac{P_{pi}F_p - P_{ai}F_a - C_{np}x_{i-1} - P_{\tau} - P_{\tau p}}{m} \quad (6),$$

$$u_i = u_{i-1} + a_i \Delta t \quad (7),$$

$$x_i = x_{i-1} + u_i \Delta t + \frac{a_i \Delta t^2}{2} \quad (8),$$

где  $C_{np}$  – приведенная жесткость механизма возврата одностороннего пневмопривода;  $P_{\tau}$  – тяговое усилие;  $P_{\tau p}$  – суммарное значение сил трения в уплотнениях;  $m$  – масса подвижных частей, приведенная к штоку.

Обобщённое уравнение движения применяется как для одностороннего так и для цилиндров двухстороннего действия. В первом случае будет отсутствовать слагаемое, соответствующее давлению в полости подпора. Во втором случае будет отсутствовать пружина, а следовательно  $C_{np}x_{i-1} = 0$ .

Время хода поршня определяется по формуле:

$$t_x = t_a + t_b + t_n + t_{\partial b} + t_z \quad (9),$$

где  $t_a$  – время срабатывания аппаратуры управления, определяемое паспортными данными;  $t_b$  – время распространения волны давления от распределителя до рабочей полости;

$t_n$  – время подъема давления до величины, достаточной для преодоления сил статического сопротивления;  $t_{\partial b}$  – время движения поршня;

$t_z$  – время заключительного периода, соответствующее подъему давления до заданного значения (определяется только для силовых пневмоприводов).

Составляющие времена  $t_n$ ,  $t_{\partial b}$  и  $t_z$  определяются путем совместного решения уравнений (4), (5), (6) при следующих ограничениях:

1. для времени наполнения:

$$a_i = u_i = x_i = 0; P_{pi}F_p < P_{ai}F_a + P_{\tau} + P_{\tau p} + C_{np}x_o$$

2. для времени движения:

$$x_i \leq S_p$$

3. для времени заключительного периода:

$$x_i = S_p; a_i = u_i = 0; p_{pi} \leq p_m$$

На основе предложенного алгоритма и математических моделей была разработана программа на языке Си++, позволяющая моделировать динамические процессы в пневмоприводе. На рис.4 представлены графики переходных процессов, происходящих в приводе.

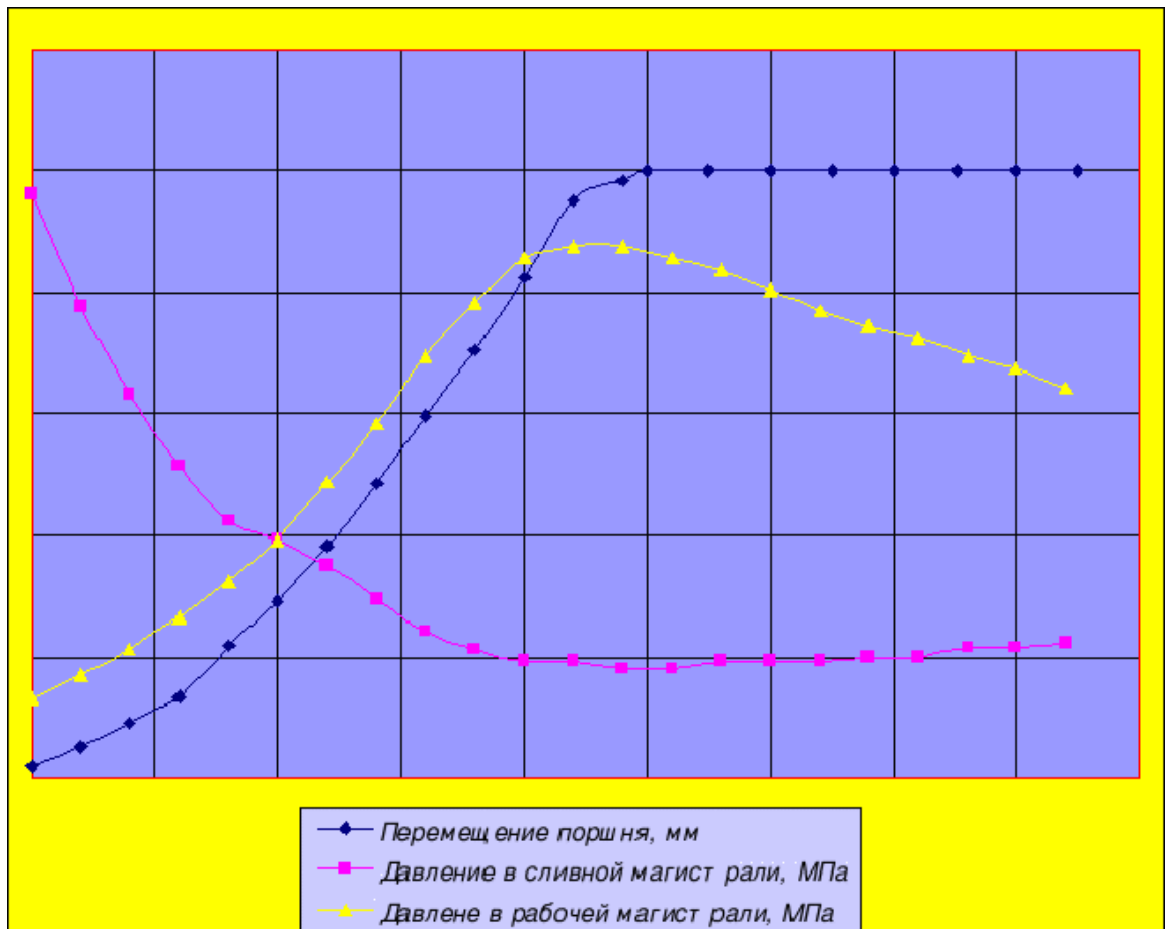


Рис.4 Графики переходных процессов

Всё проектирование при этом будет происходить в одной среде (в данном случае Windows), появляется возможность вводить дополнительные расчёты (например, проверочные формулы, позволяющие учитывать различные параметры, такие как трение и его влияние).



**Выводы:**

1. Предложен алгоритм расчёта и проектирования пневмопривода.
2. Разработана программа на языке C++ по расчёту параметров работы пневмопривода.

**Литература**

1. *Герц Е.В., Крейнин Г.В.* Динамика пневматических приводов машин-автоматов. М.: Машиностроение, 1964. 235 с.
2. *Смирнов А.М.*, Автоматизация проектирования и моделирование работы средств автоматизации кузнечно-штамповочных машин и комплексов // «Кузнечно-штамповочное производство» 1993, №4 с.30-33.

**Секция 7**  
**Технологии сварки и диагностики**

УДК 621.79

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Алексеев Сергей Олегович

*Студент 3 курса,  
кафедра «Технологии сварки и диагностики»  
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: В.М. Неровный,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики»*

Основные параметры сварного соединения определяет используемый источник энергии, который, в свою очередь, характеризуется интегральными и локальными параметрами. К первым относятся величины характеризующие источник в целом, это, например, мощность  $Q$  и сила тока  $I$ . Вторые, а именно их определению посвящена данная работа, характеризуют каждую точку в зоне воздействия источника теплоты. Таковыми являются плотность тока  $i$ , плотность мощности  $q$  и другие. Подавляющее большинство источников энергии, используемых для сварки, пайки и наплавки, являются осесимметричными, другие в данной статье не рассматриваются.

Проблема определения локальных параметров источника энергии не нова, специалисты занимаются ей уже не одно десятилетие [1]. Проведено множество исследований и экспериментов. Получены данные позволяющие качественно и, отчасти, количественно описать распределения плотности тока и плотности мощности по радиусу (для осесимметричных источников),  $i(r)$  и  $q(r)$  соответственно. Практически все основные работы в этой области были проведены десятилетия назад, когда развитие информационных технологий только начиналось. На сегодняшний день получены огромные возможности по математической обработке данных, которые ещё 20 - 30 лет назад казались научной фантастикой. В связи с таким стечением обстоятельств возникает вопрос: "А не следует ли заново обработать данные уже проведённых экспериментов и получить гораздо более точные результаты?". Конечно, не нужно пересчитывать все опыты начиная с времён Ньютона, но есть экспериментальные данные которые, однозначно, требуют уточнения.

Для этой работы была выбрана серия экспериментов по изучению дугового разряда с полым катодом (ДРПК). Этот источник энергии с большой степенью точности можно принять за осесимметричный. Трудностью при изучении ДРПК явилось то, что обычно  $i(r)$  и  $q(r)$  для сварочных источников энергии можно считать подчиняющимися нормальному закону распределения (нормально-круговые источники

теплоты), а для данного вида дугового разряда это допущение противоречило экспериментальным данным. Особенно большое расхождение теории и реальных процессов наблюдалось при значительных величинах силы тока, это проявлялось в том что по расчетам глубина проплавления получалась значительно меньше, чем на практике. Возникла необходимость как можно точнее описать распределение локальных параметров ДРПК, так как без этой информации подбор режимов для сварки становился практически не решаемой задачей. Было проведено большое число экспериментов, на описании которых хотелось бы остановиться и рассказать более подробно. Для определения тепловых параметров источника энергии применялось проточное калориметрирование. Этот метод основан на измерении разности температур  $\Delta T$  потока воды на выходе и входе в проточный калориметр, нагреваемый поверхностным источником энергии

$$q = \bar{c} \Delta T \dot{m}$$

(1)

где  $\bar{c}$  - средняя удельная теплоёмкость воды в интервале температур  $\Delta T$ , Дж/(кг\*К);  $\dot{m}$  - массовый расход воды, кг/с.

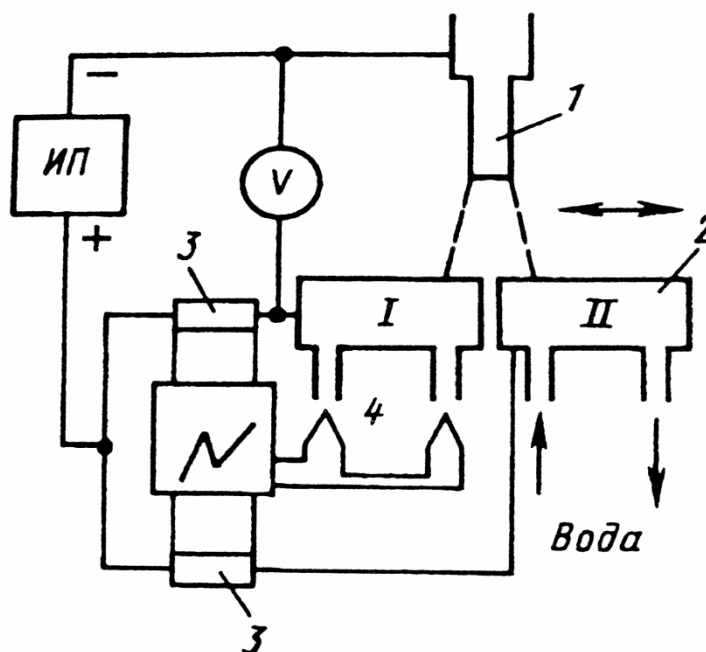


Рис. 1. Схема измерения распределения значений теплового потока  $q(x)$  и тока  $I(x)$  в ДРПК методом секционированного анода: 1 – полый катод; 2 – секционированный анод; 3-измерительный шунт; 4-дифференциальная термопара.

Вся теплота, воспринимаемая поверхностью калориметра, передаётся через стенку и уносится потоком охлаждающей воды, т.е. имеет место равновесие подводимой и отводимой мощностей. Поэтому этот метод

принято называть стационарным.

При экспериментальном определении теплоэнергетических характеристик дугового разряда применяют специальные калориметры: линейный, плоскостной и точечный [2].

Для определения  $q(x)$ ,  $i(x)$ ,  $i(r)$  и  $q(r)$  наиболее целесообразно использовать широко известную методику секционированного анода (плоскостной калориметр), который и был применён в обсуждаемой серии опытов. Плоский водоохлаждаемый зонд разделён на два участка электротепловым барьером. Температура охлаждающей воды измеряется по обоим участкам. Схема измерения  $q(x)$  и  $i(x)$  показана на рис. 1.

Стоит подробнее рассказать об используемой системе координат (см. рис. 2). Ось разряда движется в сторону анода со скоростью  $v$ ,  $R$  – радиус активного пятна.  $X$  – координата, отсчитываемая от оси до края анода,  $r$  – текущий радиус, откладываемый от оси.

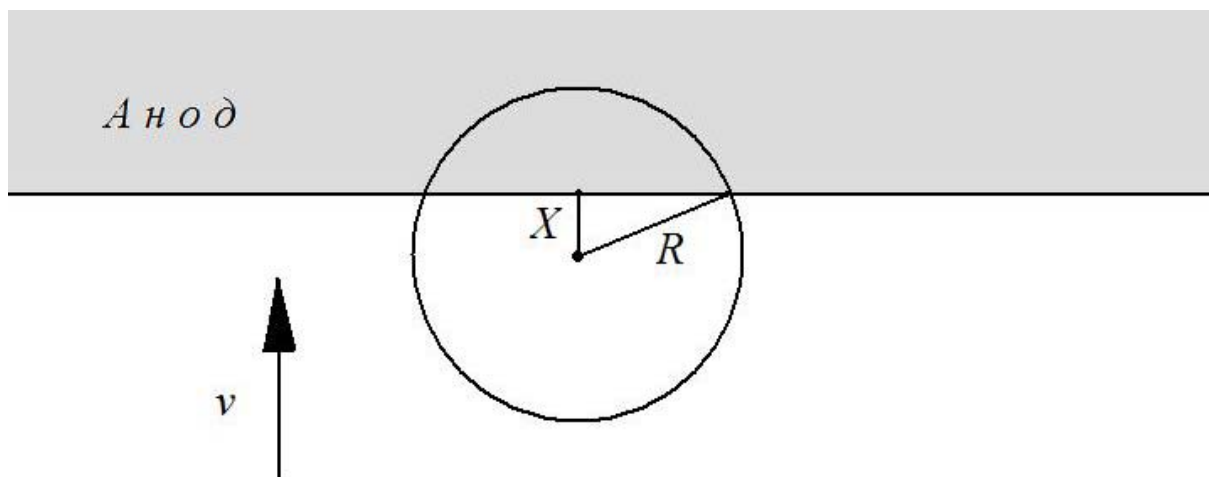


Рис. 2. Система координат

Полученные из опыта данные, характеризующие рост  $q(x)$  и  $i(x)$ , были обозначены через функцию  $\Psi(x)$ . Пользуясь принятым допущением об осесимметричности источника энергии, можно выразить значение  $\Psi(x)$  через радиальную функцию  $f(r)$ , соответствующую  $i(r)$  или  $q(r)$  [1]:

$$\Psi(x) = 2 \int_x^R f(r) \cdot r \cdot \arccos(x/r) dr. \quad (2)$$

Это уравнение можно привести к следующему виду:

$$\varphi(x) = 2 \int_x^R \frac{f(r) \cdot r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr, \quad (3)$$

откуда следует что

$$\varphi(x) = -\Psi'(x), \quad (4)$$

Решением интегрального уравнения относительно  $f(r)$  является [3]:

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\varphi'(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} - \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\Psi''(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}, \quad (5)$$

где  $R$  - радиус пятна.

Данный метод нашел широкое применение благодаря ряду преимуществ:

1. Одновременное измерение  $I, Q, q(r)$  и  $i(r)$  непосредственно в зоне воздействия дугового разряда на анод.
2. Создание условий, наиболее полно соответствующих процессам реальной теплопередачи от разряда к плоской поверхности анода-изделия.
3. Наименьшее искажение истинной картины распределения  $i(r)$  и  $q(r)$ , так как геометрические размеры зазора между плоскостными зондами могут быть существенно меньше, чем размеры линейного зонда.

Несмотря на изложенные преимущества, метод плоского водоохлаждаемого зонда, т.е. секционированного анода, имеет существенный недостаток, обусловленный сложностью математической обработки экспериментальных данных  $I(x)$  и  $Q(x)$ , поскольку, как следует из уравнения (5), требуется найти вторую производную от экспериментальной функции, что в общем случае относится к классу некорректно поставленных задач, когда даже малые погрешности в исходных данных могут привести к весьма большим ошибкам результата.

Ранее для решения этой проблемы распространённым способом было представление уравнения (5) в виде [1]:

$$f(r) = -\frac{N}{\pi R} \sum_{k=1}^N A_{k,N} \Psi(x),$$

где  $N$  - число зон радиального разбиения сварочной дуги;  $A_{k,N}$  - коэффициенты, вычисленные методом Нестора-Олсена для каждой из этих зон.

Такой способ решения часто приводит к качественному изменению вида распределения  $f(r)$ , в частности, появлению провалов в приосевой области даже при незначительном разбросе экспериментальных данных. В то время как для метода секционированного анода характерен значительный разброс экспериментальных данных, обусловленный, так называемым, шумом измерений. Различные методы сглаживания не позволяют получить значения для радиального распределения плотности тока или плотности потока мощности в приосевой зоне с погрешностью менее 20%.

Так же были использованы методы решения основанные на применении кубических сплайнов. Суть такого подхода заключалась прежде всего в аппроксимации заданной таблично функции  $\Psi(x)$  кубическими сглаживающими сплайнами  $S_{n,\alpha}$  при известных его коэффициентах и решении уравнения (5) в виде [1,3]:

$$f(r) = \frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{S_{n,a}(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}$$

Погрешность этого метода составила около 4%.

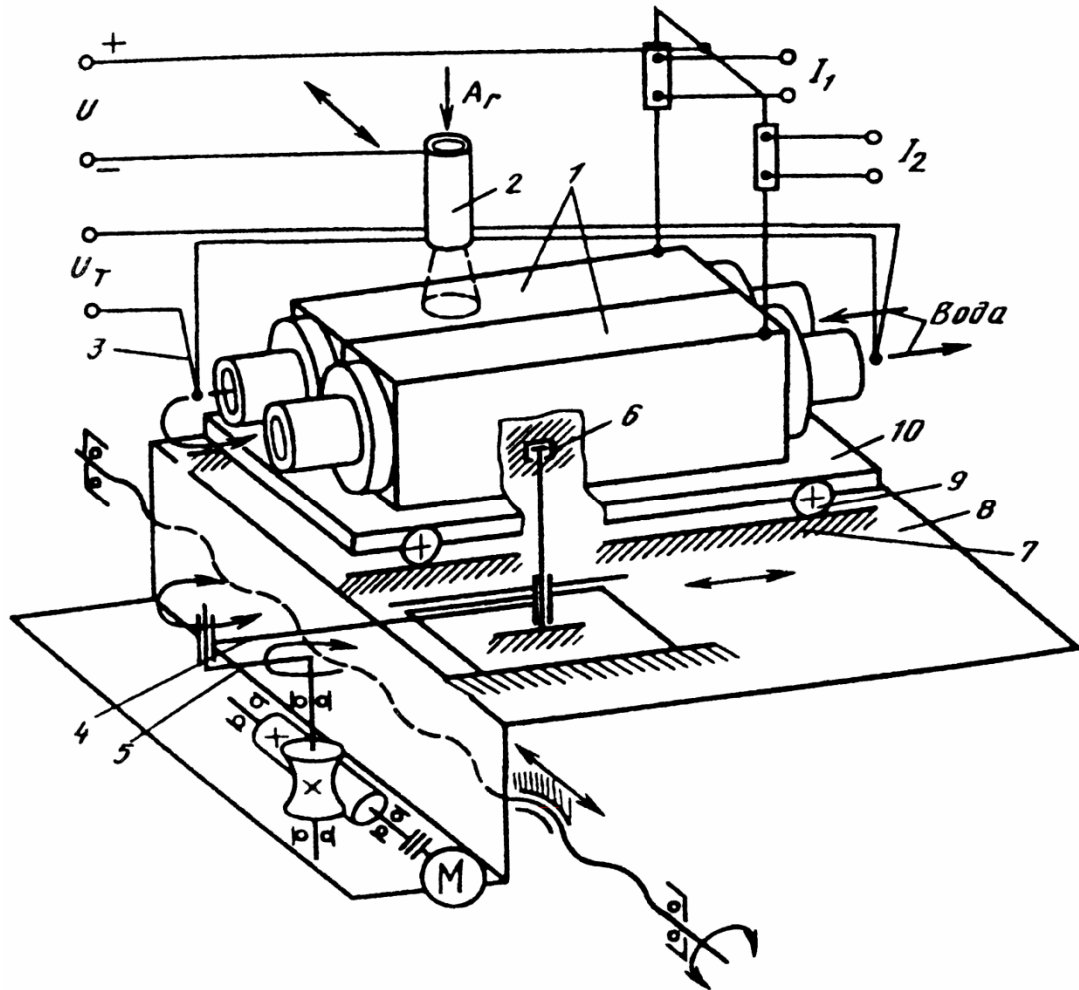


Рис. 3. Схема подвижного секционированного анода:

1 – анодные секции; 2 – полый катод; 3 – дифференциальная термопара; 4 – шатун; 5 – кривошип; 6 – шарнир; 7 – направляющие; 8 – подвижная опора; 9 – вращающиеся опоры; 10 – подвижная платформа.

Ещё одним недостатком метода секционированного анода явилось то обстоятельство, что конструкция этого прибора не позволяет измерять тепловые характеристики ДРПК на токах свыше 150 А и при длине дугового промежутка менее 2 см. Однако, проблема была решена усовершенствованием конструкции анода (Рис. 3) [4].

На сегодняшний день стремительное развитие информационных технологий позволяет нам преодолеть все вышеизложенные сложности, применяя уже разработанное программное обеспечение. Используя стандартные алгоритмы, которые за прошедшие годы перешли на абсолютно новый уровень, можно избавиться от шума измерений, более точно провести сглаживание функции, дифференцировать и интегрировать со значительно меньшими погрешностями. В данной работе была использована программа

Origin 8.

Первой задачей при нахождении функций радиального распределения локальных параметров ДРПК стала выработка нового алгоритма решения. На этом этапе ещё не важны способы сглаживания или избавления от шума, цель в разработке общего плана действий. В итоге вся задача была разбита на следующие пункты:

1. Фильтрация. С помощью различных программных средств, происходит фильтрация экспериментальных данных, шум измерений убирается. В результате имеется вид функции  $\Psi(x)$  в первом приближении (Рис. 4).

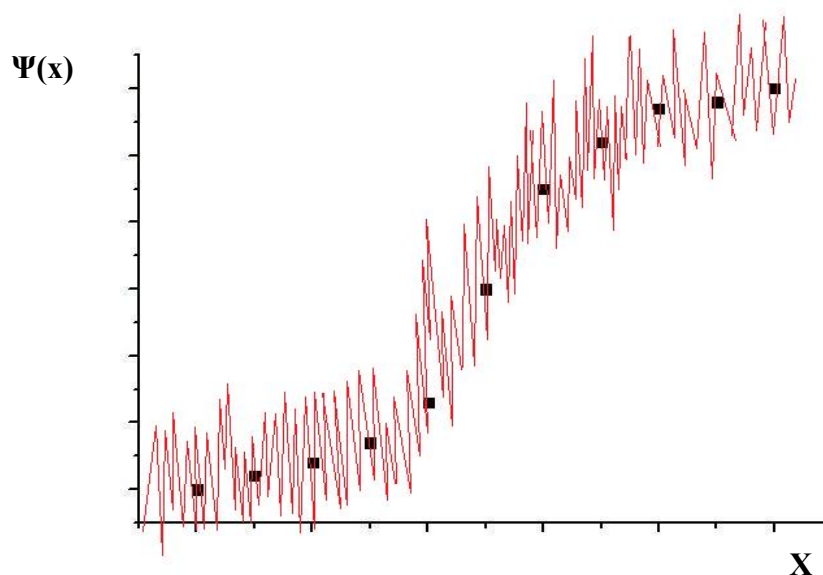


Рис. 4. Фильтрация.

2. Сглаживание. Функция, полученная в пункте 1, сглаживается, найденная зависимость  $\Psi(x)$  (рис. 5) является исходными данными для решения уравнения(5).

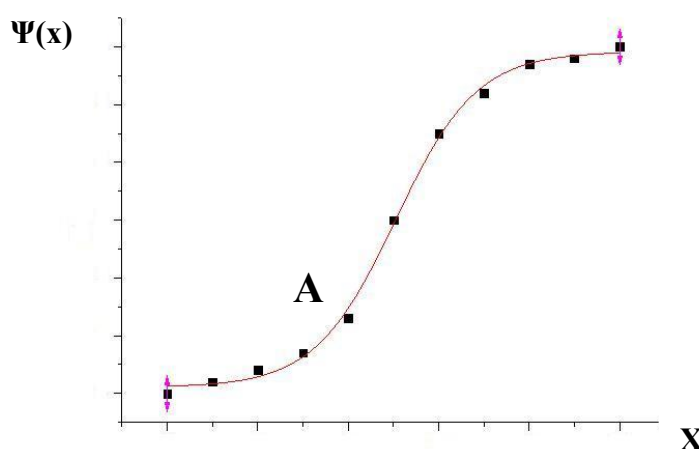


Рис. 5. Сглаживание



3. Дифференцирование. Нахождение второй производной от  $\Psi(x)$ .
4. Разбиение активного пятна. Выбираем шаг разбиения и, зная радиус активного пятна, находим значения текущих радиусов  $r_n$  для которых будут вычислены функции вида:

$$g_n(x) = \frac{\Psi''(x)}{\pi\sqrt{x^2 - r_n^2}},$$

Где  $n$  - количество зон разбиения.

Также следует отметить, что гораздо эффективнее выбирать непостоянный шаг разбиения, уменьшая его в наиболее значимых местах, например, в приосевой области.

5. Интегрирование. Функции, полученные в предыдущем пункте, интегрируются, в результате чего имеются точки с координатами (рис. 6):

$$x_n = r_n,$$

$$y_n = \int_{r_n}^R g_n(x).$$

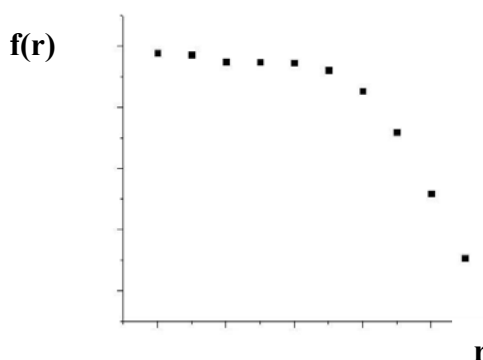


Рис. 6. Решение в первом приближении.

6. Нахождение искомой зависимости. Сглаживая полученные точки, находим искомую функцию (рис. 7).

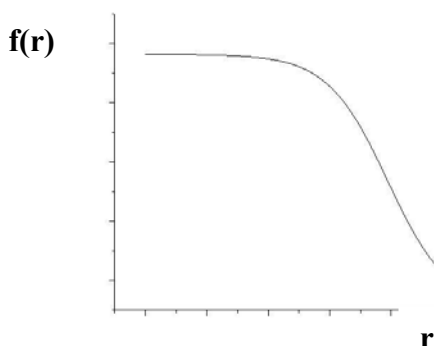
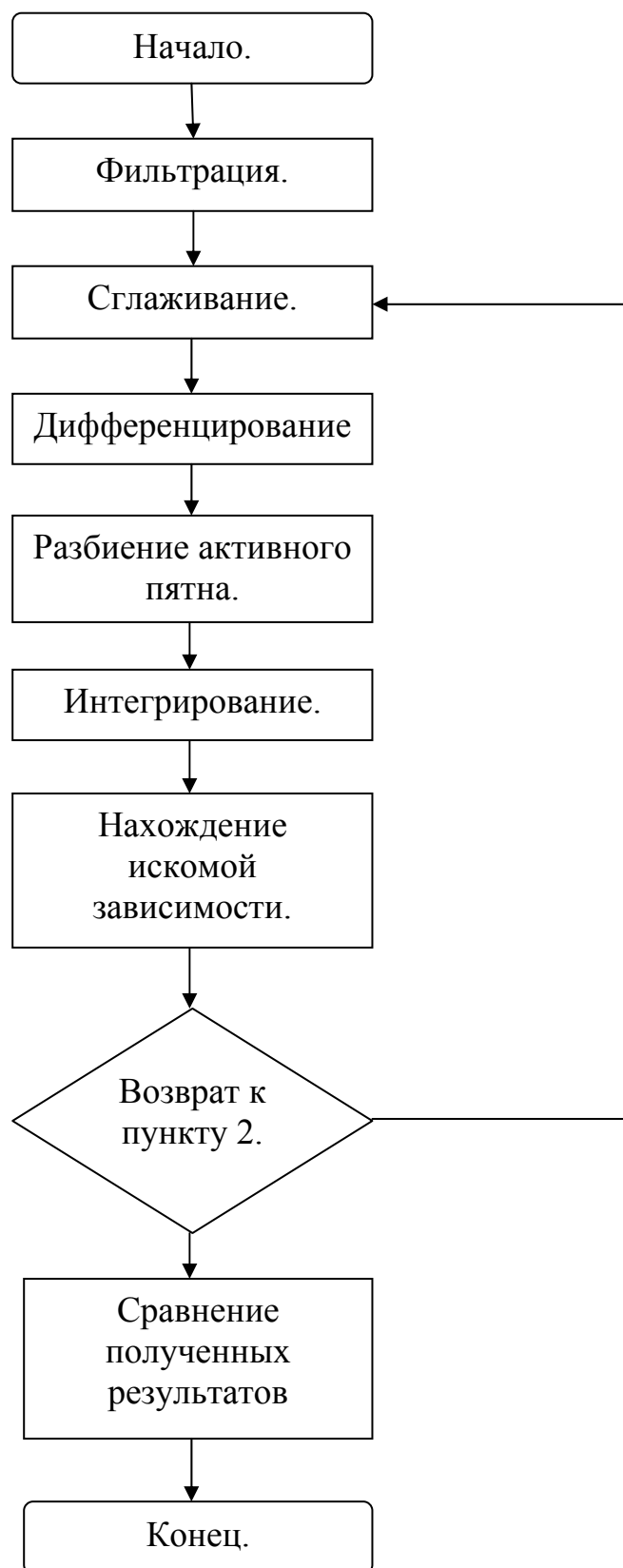


Рис. 7. Искомая зависимость

7. Возврат к пункту 2. Заново выполняем пункты 2 - 6 включительно. Находим несколько вариантов вида искомых распределений.

8. Сравнение полученных результатов. Выбираем наиболее точный вариант.

Для дальнейшей работы удобнее представить этот алгоритм в виде блок-схемы:



Блок-схема 1

Второй и наиболее трудной задачей стал выбор способа сглаживания данных, полученных после фильтрации. В ходе работы было применено более 20 методов сглаживания, среди которых было выбрано 3 наиболее удачных. Использовались функции вида:

1.  $y = a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x + a_6$
2.  $y = a \cdot (1 - e^{-bx})$
3.  $y = A_1 + \frac{(A_2 - A_1)}{(1 + 10^{p \cdot \ln(x_0 - x)})}$

Так как исследуемый источник энергии осесимметричный, то можно использовать только часть функции  $\Psi(x)$ , находящуюся по одну сторону от точки перегиба А (см. рис. 5). При сглаживании для функций вида 1 и 2 предполагается использование только указанной части  $\Psi(x)$ , для функции вида 3 - всей зависимости.

В результате были найдены 3 варианта зависимостей локальных параметров ДРПК от радиуса, наиболее точным из которых оказался вариант полученный, с применением сглаживания экспоненциальной функцией вида 2. Ниже приведены конечные результаты обработки экспериментальных данных для ДРПК с различными значениями силы тока (рис. 8).

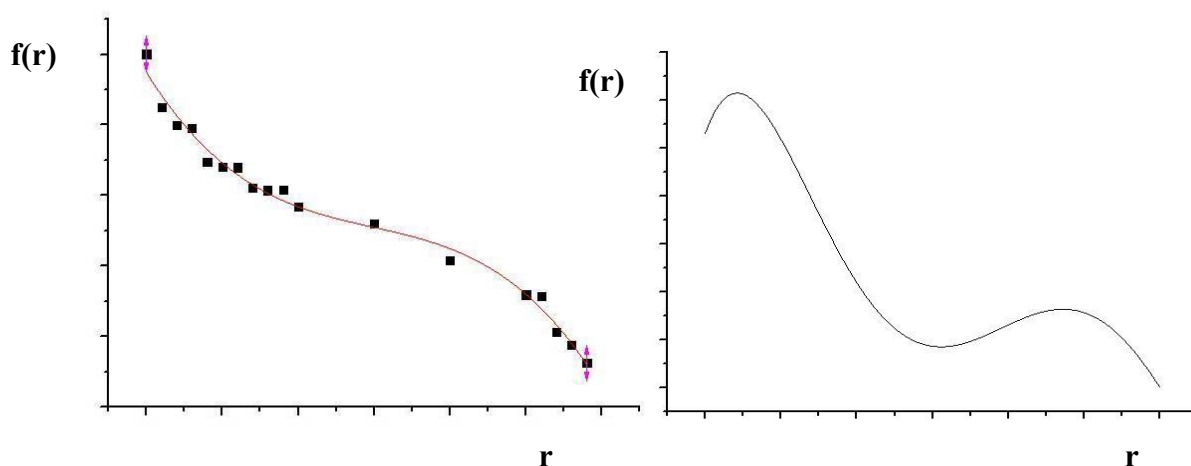


Рис. 8. Результаты обработки экспериментов с различными параметрами дуги.

Какие выводы можно сделать из полученных результатов? Выше уже говорилось, что описать зависимости  $i(r)$  и  $q(r)$  ДРПК нормальным законом распределения, как это делается для других источников энергии в сварочных процессах, нельзя. И полученные зависимости это подтверждают, в приосевой области наблюдается резкий скачок плотности тока и плотности потока мощности. Этим и объясняется столь сильное различие расчетной и реальной мощностей ДРПК.

Таким образом, разработанный в этой работе алгоритм, применим для обработки любых экспериментов, связанных с нахождением радиальных распределений параметров, характеризующих осесимметричные объекты. Но основное применение этих алгоритмов предполагается для изучения сварочных источников энергии.

### Литература

1. Шоек П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. -М.: Энергия, 1966. - С. 110-139.
2. Соснин Н.А. Определение радиального распределения удельной термической мощности и плотности тока по пятну нагрева дуги стабилизированной потоком газа // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. - 1974. - № 336. - С. 75-81.
3. Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике // Издательство «Наука» сибирское отделение.- Новосибирск, 1984.
4. Неровный В.М., Федичев В.П., Подъяпольский Г.В. Измерение радиальных распределений теплоэнергетических параметров на аноде сильноточного дугового разряда низкого давления // Инженерно-физический журнал. - 1988. - Т. 54, № 2. -С. 256-262.

УДК 621.791.14

## СВАРКА ТРЕНИЕМ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Кашук Николай Михайлович

*студент 6 курса кафедры «Технологии сварки и диагностики»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель:*

*Макаров Эдуард Леонидович*

*доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

### Постановка задачи

В последнее время все большее распространение получают трехслойные алюминиевые панели (рис. 1). Они широко применяются в вагоностроении, судостроении и аэрокосмической промышленности. Использование таких панелей позволяет значительно снизить массу конструкции, что обеспечивает малый расход топлива. Замена плит и балок на трехслойные алюминиевые панели возможна благодаря их высокой жесткости. Ширина прессованных панелей ограничена. Например, для двадцатиметровых панелей она составляет 600 мм. Поэтому возникает необходимость наращивать панели до требуемых размеров.

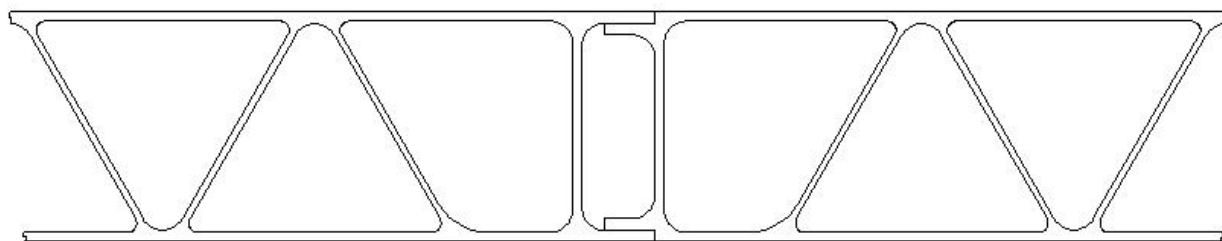


Рис. 1. Поперечное сечение трехслойной панели

Дуговая сварка помимо традиционных для сварки алюминия проблем, таких как пористость, холодные и горячие трещины в шве, приводит к значительному короблению панелей, обусловленному высоким тепловложением. Поэтому возникает необходимость использовать методы сварки, для которых характерно относительно малое тепловложение. При этом использование лазерной и электроннолучевой сварки требует обеспечения чрезвычайно малого зазора по всей длине панелей, что практически невыполнимо. Поэтому было предложено использовать относительно новый метод сварки - трением с перемешиванием (СТП) [1]. Данный метод получил широкое распространение при сварке алюминия в различных отраслях промышленности в России и за рубежом.

Схема процесса проста (рис. 2). Вращающийся инструмент 6, состоящий и опорного бурта 3 и рабочего стержня 4, погружается в зазор 2 между соединяемыми деталями 1А и 1В. После погружения инструмент, продолжая вращаться, перемещается вдоль стыка, образуя сварной шов 7. Тепла, выделяющегося при трении, достаточно для пластификации металла заготовок и вращающийся инструмент свободно «перемешивает» их, соединяя между собой. В результате получается сплошной шов со свойствами во многом превосходящими свойства шва, полученного дугowymi методами сварки [2].

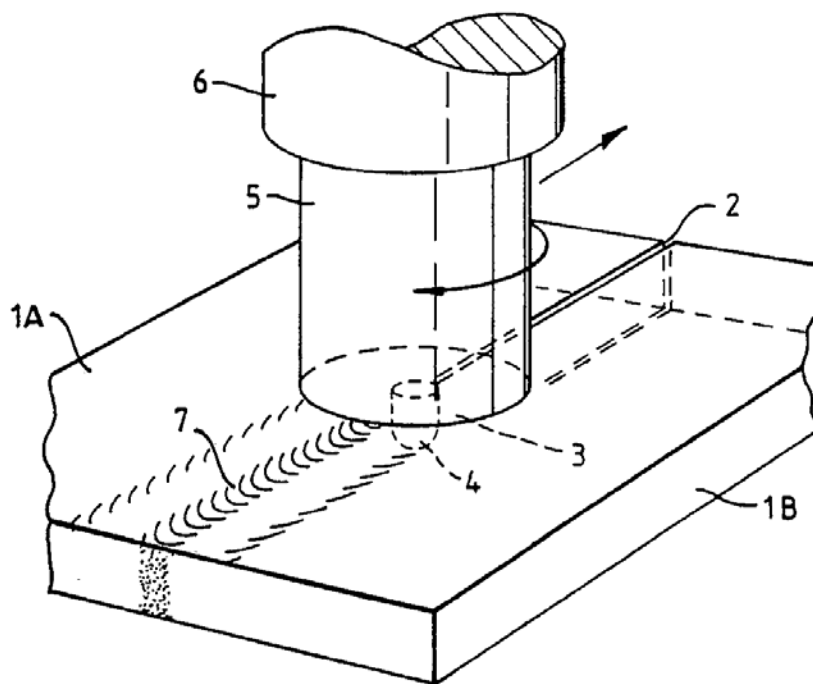


Рис. 2. Принципиальная схема процесса СТП

Основной отличительной чертой процесса СТП является то, что сварка проходит в твердой фазе, т.е. материал заготовок не плавится. Это дает процессу СТП значительные преимущества по сравнению с традиционной сваркой плавлением: отсутствие горячих, холодных трещин и порообразования, возможность сварки трудносвариваемых материалов, в том числе и в различных сочетаниях. Также отсутствие необходимости плавить металл при сварке позволяет вести процесс с малым тепловложением, что в свою очередь приводит к незначительному росту зерна в ЗТВ, малым остаточным деформациям и напряжениям, а также к меньшему разупрочнению при сварке термоупрочняемых алюминиевых сплавов. Кроме того процесс легко поддается автоматизации и обладает высокой экологичностью.

### Экспериментальное подтверждение

Авторами были проведены исследования принципиальной возможности сварки панелей методом СТП. Предварительные исследования проводились на пластинах сплава АД31, аналогичного по химическому составу материалу АА6005 трехслойных панелей, применяющихся при производстве корпусов вагонов (табл.1).

**Табл. 1. Химический состав сплавов АД-31 и АА6005, %**

Марка сплава	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
АД31	0,2 – 0,6	0,5	0,1	0,1	0,45 – 0,9	0,1	0,2	0,15	Основа
АА6005	0,6 - 0,9	0,35	0,1	0,1	0,4 – 0,6	0,1	0,1	0,1	Основа

Эксперименты проводили с использованием модернизированного фрезерного станка марки FNGJ32 на производственной базе ОАО «НИАТ». Свариваемые пластины имели длину 180 мм, ширину 40 мм и толщину 2 мм. Сварку вели на различных режимах (рис. 3). После сварки образцы подвергали испытанию на загиб (рис. 4). В итоге были подобраны параметры процесса, обеспечивающие получение качественного бездефектного шва: режим «3» на рис. 3 и рис. 4.

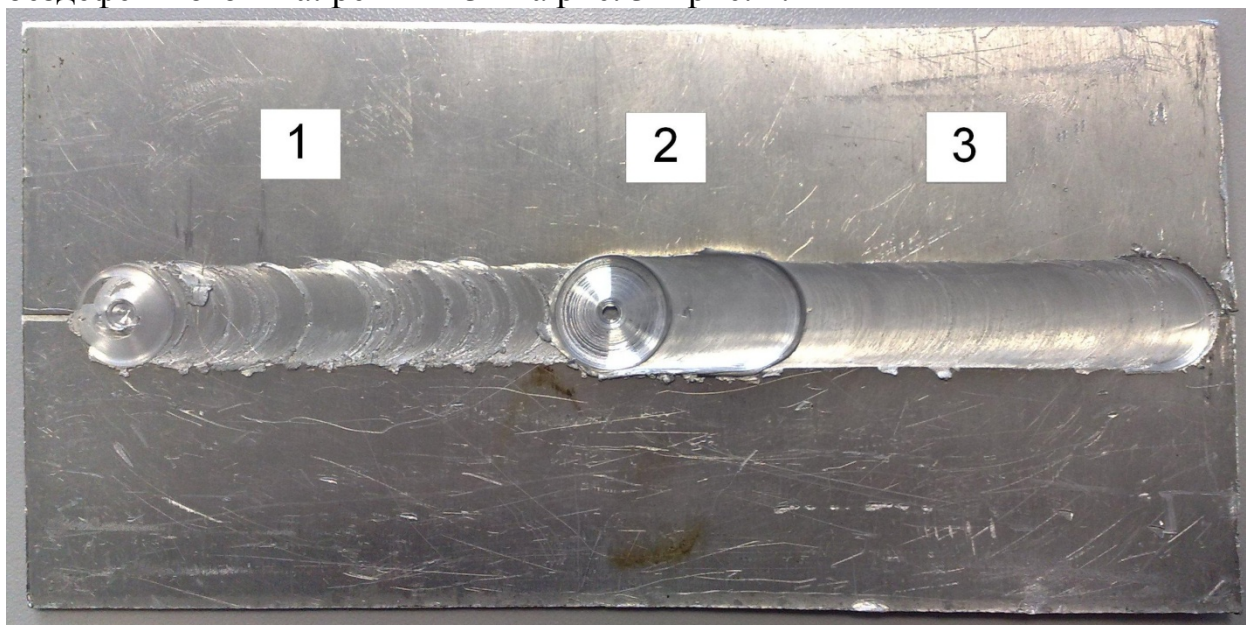


Рис. 3. Внешний вид сварного соединения. «1», «2» и «3» - участки шва, выполненные на различных режимах сварки

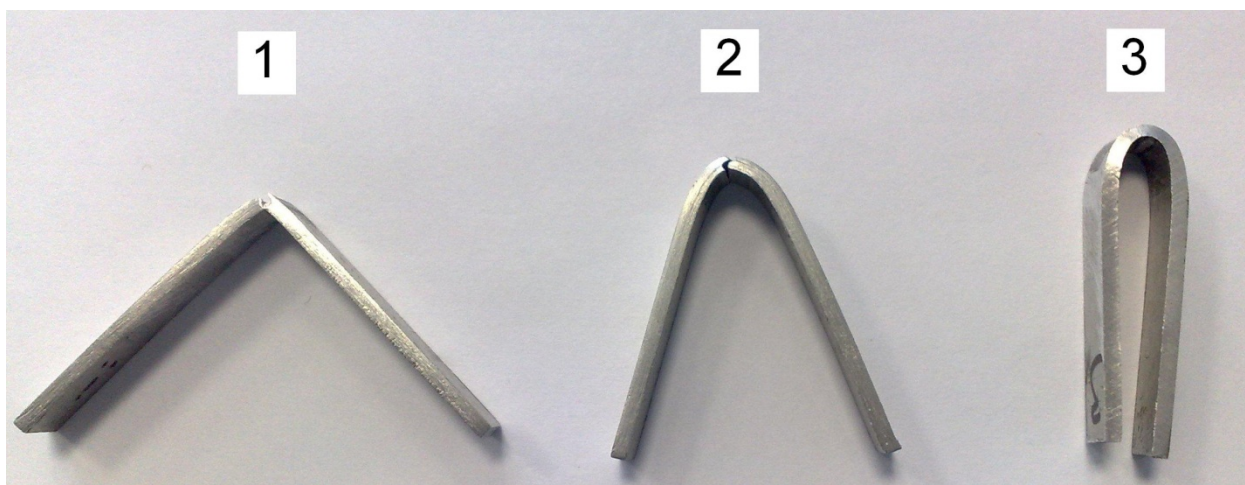


Рис. 4. Результаты испытаний на загиб образцов, сваренных на различных режимах

После того, как была показана принципиальная возможность получения качественного сварного соединения на сплаве АД-31, выполняли сварку натурального образца трехслойной алюминиевой панели. Две части панели собирали в замковое соединение и сваривали с двух сторон. С одной стороны выполнялся шов глубиной 4 мм, а с другой 6 мм.

Режимы сварки были скорректированы с учетом толщины свариваемых деталей, формы инструмента и геометрии конструкции. Сваренная панель (рис. 5) имеет размеры 430 x 520 x 50 мм.

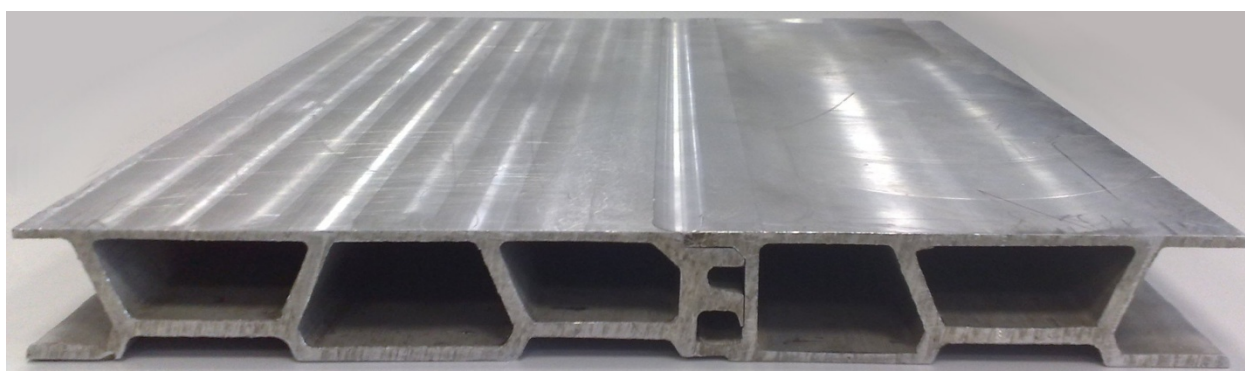


Рис. 5. Сваренная трехслойная алюминиевая панель

### Расчет тепловложения

После того как была показана принципиальная возможность сварки трехслойных алюминиевых панелей методом СТП, авторами была проведена сравнительная оценка тепловложения при СТП и дуговой сварке. Удельное тепловложение можно рассчитать, зная мощность источника теплоты и скорость его движения:

$$Q = P/v,$$

где  $Q$  – удельное тепловложение, Дж/мм

$P$  – мощность источника теплоты, Вт

$v$  – скорость сварки, мм/с



При дуговой сварке неплавящимся электродом алюминиевых пластин толщиной 2 мм мощность теплового источника составляет [3]:

$$P_{\text{дуг}} = \eta \cdot I \cdot U = 0.9 \cdot 140\text{А} \cdot 20\text{В} = 2520\text{Вт},$$

где  $\eta$  – КПД сварочного источника, %

$I$  – сила сварочного тока, А

$U$  – напряжение на дуге, В

При СТП параметрами, влияющими на мощность источника теплоты, являются как минимум скорость сварки, скорость вращения и глубина погружения инструмента. В настоящее время не известно о прямых уравнениях для определения тепловложения в зависимости от этих трех факторов, поэтому мощность теплового источника при СТП определяли экспериментально. Для этого во время сварки замеряли ток на обмотках двигателя шпинделя станка, значение которого составило 5А. Считая, что КПД двигателя при нагрузке меньше номинальной равен 0,7 и напряжение в каждой фазе трехфазной сети составляет 220В, можно вычислить полезную мощность, потребляемую двигателем:

$$P_{\text{эд}} = \sqrt{3} \cdot \eta \cdot I \cdot U = \sqrt{3} \cdot 0.7 \cdot 5 \cdot 220 = 1334\text{Вт}$$

С учетом потерь тепла в инструмент, которое составляет порядка 0,8 от полной вводимой мощности [4], можно рассчитать мощность теплового источника:

$$P_{\text{СТП}} = P_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{инстр}} = 1334 \cdot 0.8 = 1067\text{Вт}$$

Сравнивая мощности источников теплоты и тепловложение при СТП и дуговой сварке (табл. 2), можно сказать, что тепловложение, и следовательно остаточные деформации и напряжения, при СТП значительно ниже, чем при дуговой сварке. Кроме того, процесс СТП можно вести на больших скоростях сварки, что приведет к дополнительному уменьшению тепловложения.

**Табл. 2. Сравнения мощности теплового источника и удельного тепловложения при дуговой сварке и СТП**

Вид сварки	Мощность теплового источника, Вт	Скорость сварки, мм/с	Удельное тепловложение, Дж/мм
Дуговая сварка	2520	5	504
СТП	1067	3.5	304

### Расчет максимальных температур

Для точного определения величины остаточных напряжений и деформаций применяются методы численного моделирования. Первым этапом решения такой задачи является построение тепловой модели процесса сварки и расчет термического цикла каждой точки заготовки. Тепловую

модель строили в программном комплексе «СВАРКА», разработанном на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана [5]. Разработанная модель позволяет на основе входных параметров (мощность источника теплоты, теплофизические свойства материала, размеры инструмента, размеры заготовок) определить температуру любой точки заготовки.

Геометрическая модель (рис. 6) включала в себя заготовку 1, стальную подкладку 2 и переходный слой 3 между ними, введенный для более точного описания теплоотвода в стальную подкладку. Также при моделировании учитывали теплоотдачу в воздух с поверхностей заготовки, зависимость теплофизических свойств материала от температуры и распределенный характер источника теплоты.

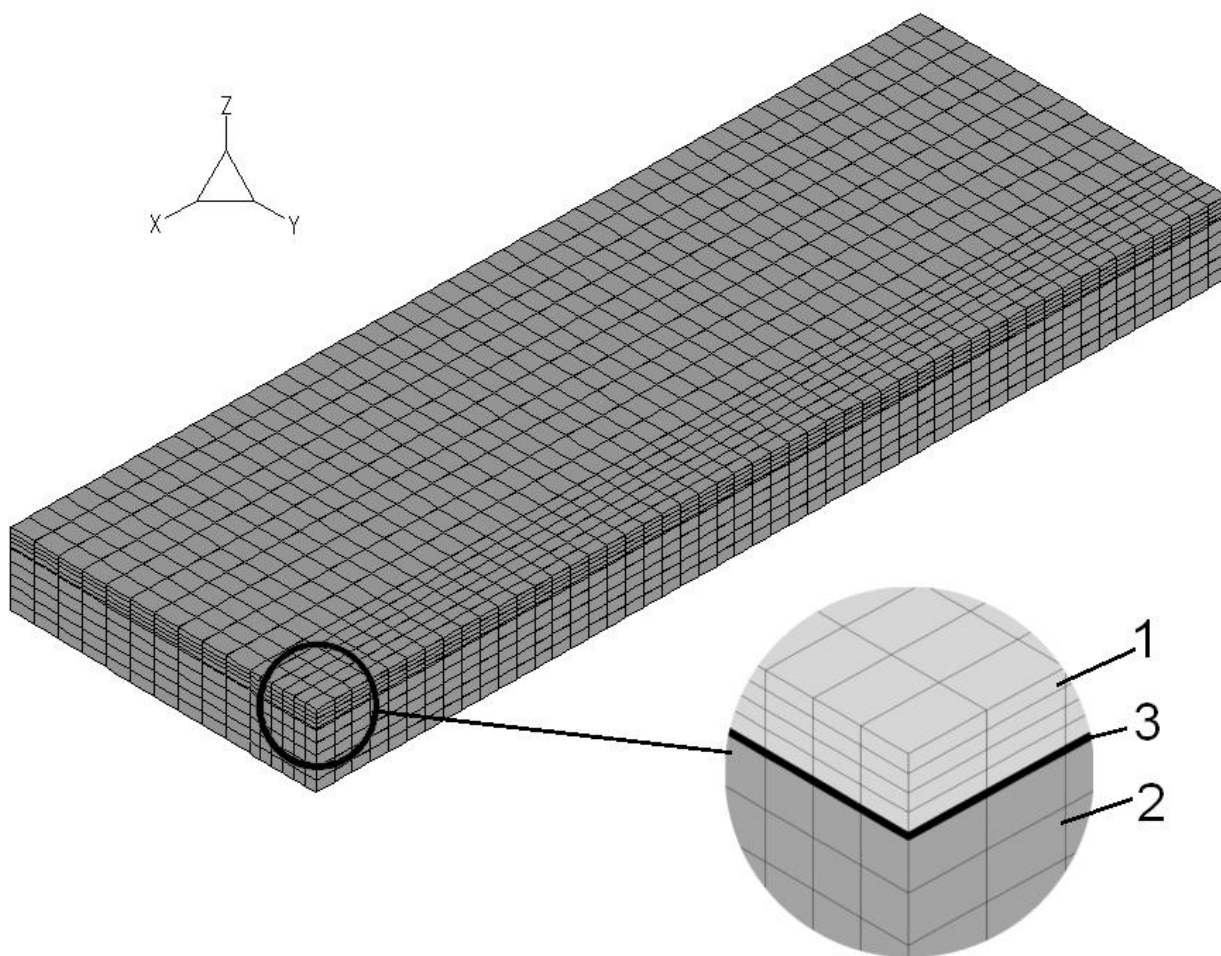


Рис. 6. Геометрическая модель (показана половина модели): 1 – заготовка; 2 – стальная подкладка; 3 – переходный слой.

Расчетные температуры сравнивали с экспериментальными данными, полученными измерением температуры заготовки в процессе сварки. По результатам сравнения был сделан вывод о достаточно высокой точности построенной модели (отклонение в пределах 5%).

Расчетные значения максимальных температур вдоль оси OY (рис. 6) на поверхности двухмиллиметровой пластины сплава АД31 для СТП и

дуговой сварки (для режимов, приведенных в табл. 2) показаны на рис. 7. Как видно из рисунка, максимальные температуры в пластине при дуговой сварке значительно выше, чем при СТП, особенно в области сварного шва.

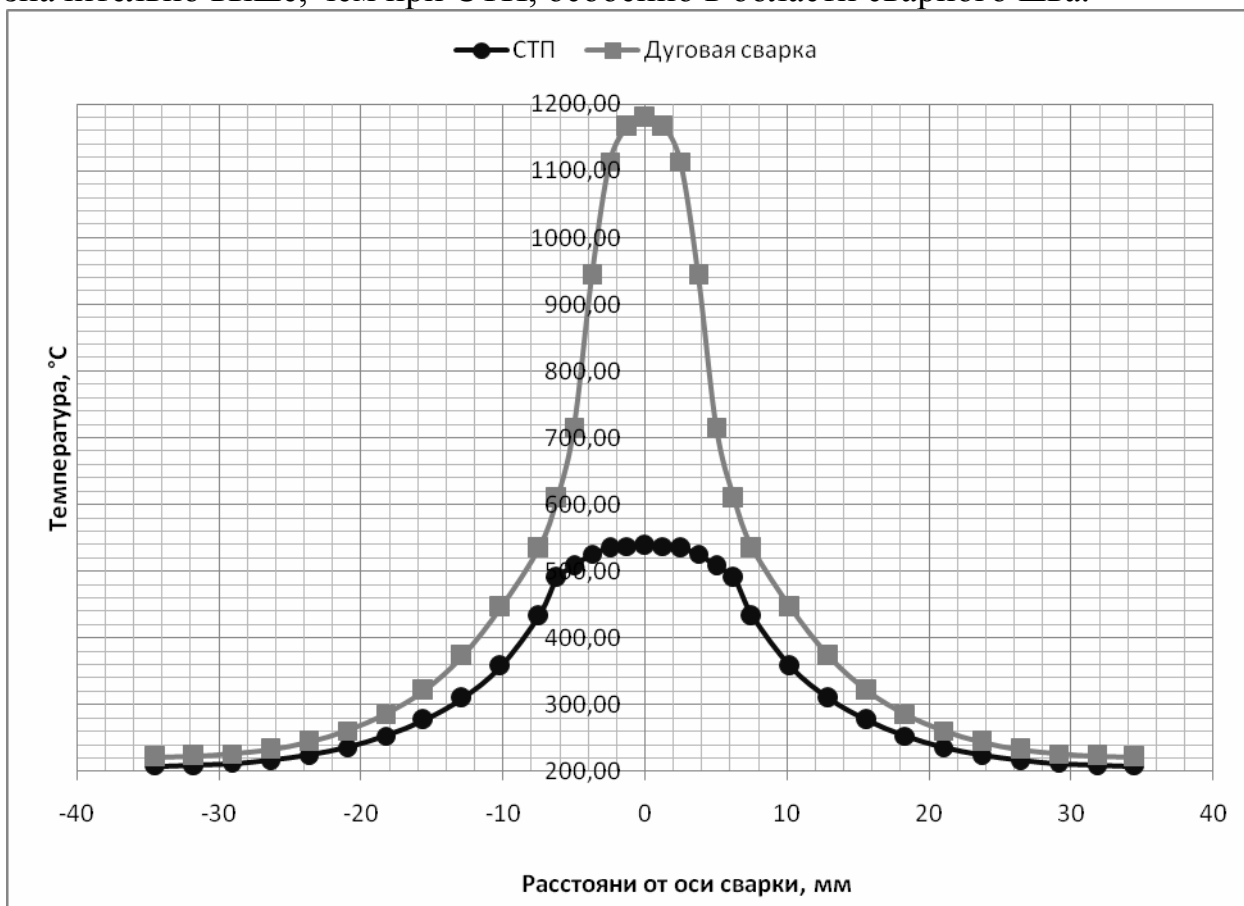


Рис. 7. Распределение максимальных температур по поверхности пластины сплава АД-31 вдоль оси OY при СТП и дуговой сварке

## Выводы

Проанализированы причины коробления трехслойных алюминиевых панелей при дуговой сварке, обусловленные высоким тепловложением. Предложено вести сварку методом СТП, для которого характерно меньшее, чем при дуговой сварки тепловложение.

Экспериментально показана принципиальная возможность сварки трехслойных панелей методом СТП. На технологических образцах подобраны режимы сварки, обеспечивающие качественное формирование шва.

Расчет тепловых полей методом конечных элементов показал, что при СТП максимальные температуры нагрева заготовки, а следовательно и остаточные деформации, значительно ниже, чем при дуговой сварке.

В последующих работах авторами планируется перенести тепловую модель на геометрию трехслойной панели и провести расчет остаточных напряжений и деформаций при СТП и дуговой сварке.

### Литература

1. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса СТП (аналитический обзор) Ч.3 // Сварочное производство. 2007. №11. С. 36 – 45.
2. Perinet R., Goussain J.C., Costa B.D. Comparison of the mechanical and corrosion behavior between friction stir welded joints and MIG welded joints in 7020 aluminium alloy // 5<sup>th</sup> International Symposium of friction stir welding. Metz (France), 2004.
3. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х томах/ Под ред. А.И. Акулова. Т. 1 – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.
4. Heat Flow Into a FSW Tool / T. Dickerson, Q. Shi, H.R. Shercliff // 4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA), 2003
5. Программный комплекс «Сварка» - инструмент для решения практических задач сварочного производства / Куркин А.С., Макаров Э.Л. // Сварка и диагностика. 2010. №1. С. 16 – 24.

УДК 658.562.6

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Мигулина Антонина Олеговна

*Студентка 6 курса,*

*кафедра «Технологии сварки и диагностики»*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Б.Г. Маслов,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики»*

Радиографический контроль сварных швов и литья является основным методом контроля качества изделий. Это связано в первую очередь с тем, что метод не требует никакой подготовки зоны контроля, а информация о размерах и пространственном положении дефектов при использовании современных методов цифровой радиографии, может быть получена, практически, в режиме реального времени.

Преимущества радиографического метода:

- обладает высокой пространственной разрешающей способностью;
- имеет место наличие документа контроля;
- позволяет контролировать практически любые материалы и широкий диапазон толщин;
- обеспечивает необходимую чувствительность.

Однако этот вид контроля является одним из самых дорогих. Основными составляющими себестоимости (до 90%) являются расходные материалы – рентгеновская пленка, химикаты для ее проявления и рабочее время персонала. Для проявки пленки требуется темная комната. Также существует проблема утилизации химических отходов получаемых в процессе проявления.

Отечественная и зарубежная промышленность в течение ряда лет активно работали над уменьшением себестоимости радиографического контроля. Появились рентгенотелевизионные системы, которые позволяли получать внутреннее изображение сварного шва непосредственно на экране компьютера, минуя рентгеновскую пленку. К сожалению, рентгенотелевизоры большие и тяжелые, что затрудняет их использование. Качество изображения, получаемого на рентгенотелевизионных системах, также уступает качеству рентгеновской пленки.

Современный уровень развития цифровых систем привел к появлению принципиально новой технологии, в которой удалось совместить легкость, гибкость, качество и удобство использования рентгеновской пленки с

высокой экономичностью рентгенотелевизионных систем. Эта технология получила научное название CR.

CR (Компьютерная Радиография) – это техника, позволяющая получать рентгеновское изображение на запоминающих люминофорных гибких пластинах (далее фосфорных). Затем информацию считывают с пластины с помощью сканера для её последующей визуализации и анализа.

Схема контроля строится точно так же, как и в традиционной радиографии, исключая проявку рентгеновской плёнки. Фосфорная пластина прикрепляется к сварному шву или другому объекту. Гибкость позволяет согнуть ее по форме объекта. Можно использовать существующие свинцовые экраны и кассеты. Затем производится экспонирование с помощью любого источника рентгеновского или гамма-излучения. Возможно применение рентгеновских аппаратов постоянного потенциала, импульсных и полупериодных аппаратов, а также гамма-изотопов селена, иридия, цезия, кобальта и других. Пластины совместимы с любыми источниками радиации с энергиями от 10 кэВ до 25 МэВ.



Рис. 1. Схема контроля с использованием фосфорных пластин

Фосфорные пластины это:

- гибкость;
- четкость изображения;
- широкий выбор форматов;
- портативность оборудования;
- универсальность (возможность работы с гибкими или жесткими кассетами);
- эффективность: достаточно высокая чувствительность и производительность.

Пластины могут изгибаться, повторяя рельеф объекта контроля, а также могут быть нарезаны в нужный размер. Минимально допустимый размер пластины составляет 100x180 мм. В кристаллах фосфорной пластины за время экспозиции накапливается радиационное изображение, которое формируется под действием рентгеновского или гамма-излучения. Фосфорная пластина используется многократно, путём стирания ранее полученных радиационных изображений. Радиографические снимки, полученные с фосфорных пластин сканированием, переводятся в цифровой формат для последующей расшифровки снимков и их архивирования. В качестве выходного экрана преобразователя радиационного изображения используется экран монитора, входящего в состав комплекса цифровой радиографии.

Свинцовые усиливающие экраны оказывают на фосфорные пластины такой же эффект, как и на радиографическую пленку - являются усилителями рентгеновского излучения и фильтруют рассеянное излучение. Флуоресцентные экраны не повышают чувствительность фосфорных пластин, т.к. пластины слабо чувствительны к видимой области спектра.

Динамический диапазон. Динамический диапазон по стали показывает разницу минимальной и максимальной толщины исследуемого объекта, которые одновременно видны на одном результирующем снимке. Чем этот диапазон больше, тем выше перепад толщин, на которых можно обеспечить одинаковое качество на одном снимке. Особенно это актуально при просвечивании объектов с большими перепадами толщин, например, запорная арматура или турбинные лопатки. Динамический диапазон самой фосфорной пластины очень велик и предъявляет высокие требования к электронике сканера. Динамический диапазон всей системы является общей оценкой всех устройств, входящих в систему.

Кстати, то, что в цифровой технике обычно называется динамическим диапазоном, правильно называть фотографической шириной. Именно так называется аналогичный параметр у рентгеновских пленок.

На рисунках 2 и 3 представлены снимки, сделанные на рентгеновскую плёнку и фосфорную пластину, показывающие высокое значение динамического диапазона фосфорной пластины, позволяющее делать одну экспозицию для разнотолщинных деталей.

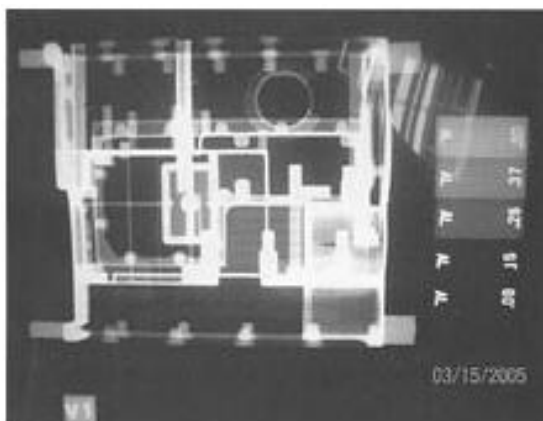


Рис. 2. Рентгеновская пленка  
63 кВ 10 мА 60 сек

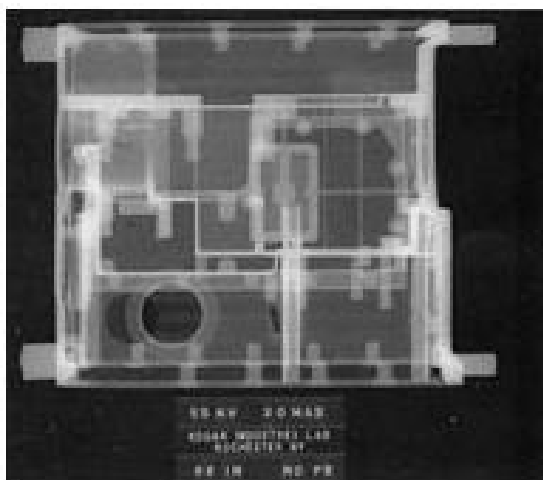


Рис. 3. Фосфорная пластина  
55кВ 1 мА 30 сек

Поскольку чувствительность фосфорной пластины выше, чем у рентгеновской пленки, время экспозиции можно уменьшить в 5-10 раз, что экономит ресурс дорогостоящей рентгеновской трубки и существенно уменьшает дозовую нагрузку на персонал. На рисунках 4 и 5 представлены снимки трубы диаметром 133 мм, толщиной стенки 5 мм на рентгеновский аппарат "Арина 5". Время экспозиции на фосфорную пластину в 2 раза меньше, чем на рентгеновскую плёнку, а качество не хуже.

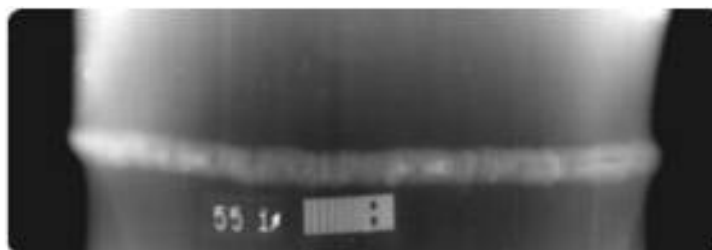


Рис. 4. Рентгеновская плёнка. Время экспозиции 20 с



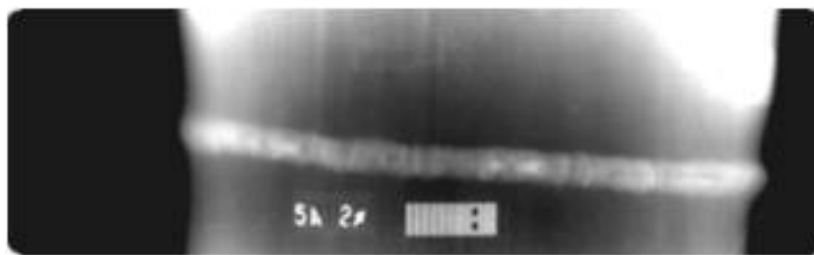


Рис. 5. Фосфорная пластина. Время экспозиции 10 с

Анализ результатов эксперимента для оценки чувствительности и производительности контроля.

Перед внедрением многоразовых запоминающих пластин в производство было проведено множество испытаний.

Результаты испытаний радиографической плёнки типа D4, D5, D7 и экранов «Фосфоматик» - Flex HR при использовании рентгеновского излучения; уровень серого  $\approx 20\%$ ; свинцовый усиливающий экран толщиной  $\delta = 0,027\text{мм}$ , фокусное расстояние (источник-кассета)  $F = 800\text{мм}$  представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Результаты испытаний**

Просвечиваемая толщина стали, $\delta$ , мм	Радиографическая плёнка									Фосфоматик-40			Требования ГОСТ 7512-82 к чувствительности контроля, $\delta_{\min}$			
	$U_{\text{р.т.}}$ , кВ	D4			D5			D7			Flex HR			Класс 1	Класс 2	Класс 3
		$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	D, ед. опт.плот	$\delta_{\min}$ , мм	$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	D, ед. опт.плот	$\delta_{\min}$ , мм	$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	D, ед. опт.плот	$\delta_{\min}$ , мм	$U_{\text{р.т.}}$ , кВ	$I_t$ , $\text{мА} \times \text{мин}$	$\delta_{\min}$ , мм			
2	90	16	1,6	0,05	10,7	1,4	0,063	5,3	1,3	0,08	70	12	0,06	0,10	0,10	0,20
											80	5,4	0,08			
											90	0,7	0,10			
4,5	110	14	1,5	0,08	9,3	1,7	0,10	4,7	1,2	0,10	80	12	0,08	0,10	0,10	0,20
											90	5,4	0,10			
											100	1,0	0,10			
12	150	36	1,5	0,16	24	1,5	0,20	12	1,3	0,20	120	12	0,16	0,20	0,30	0,40
											150	1,7	0,20			
21	215	16	1,5	0,20	10,7	1,5	0,25	5,3	1,5	0,32	160	12	0,25	0,40	0,50	0,63
											180	5,4	0,32			
											200	1,0	0,32			
30	280	8	1,4	0,32	5	1,6	0,32	2,5	1,5	0,40	220	12	0,32	0,40	0,50	0,63
											240	2,7	0,40			
											280	1,2	0,40			
40	400	3,7	1,4	0,40	2,5	1,5	0,50	1,25	1,3	0,50	280	12	0,40	0,50	0,63	0,80
											300	2,0	0,50			
											310	1,25	0,50			
55	400	15	1,5	0,50	10	1,4	0,63	5,0	1,3	0,63	300	12	0,50	0,80	1,00	1,25
											330	5,4	0,63			
											350	2,5	0,80			
75	400	72	1,6	0,63	32	1,4	0,80	24	1,3	0,80	350	20	0,80	1,00	1,25	1,60
											400	6,5	1,00			
100*	400	-	-	-	-	-	-	300	1,3	1,0	400	64	1,00	1,00	1,25	1,60

\* Фокусное расстояние уменьшено с  $F = 800\text{мм}$  до  $F = 700\text{мм}$

На рисунках 6 и 7 графически представлены результаты проведения испытаний по сравнению времени экспозиции и чувствительности фосфорной пластины и рентгеновской плёнки.

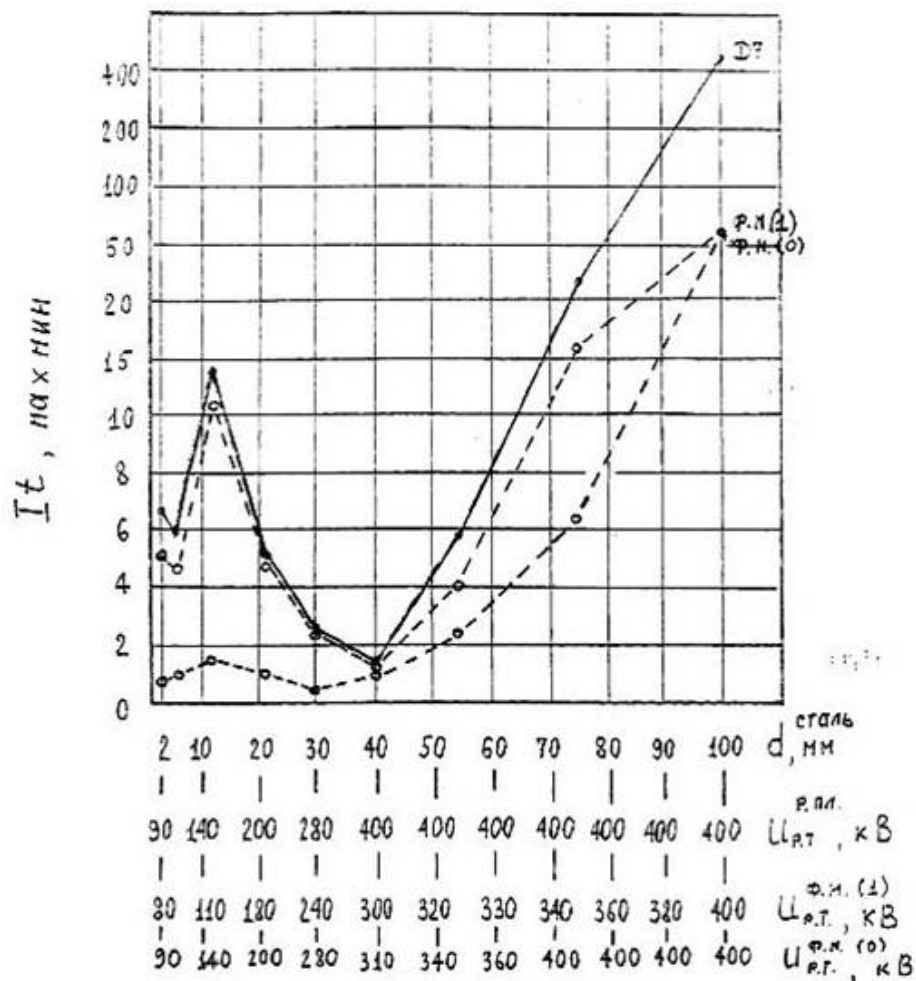


Рис. 6. Номограммы экспозиций рентгенопросвечивания.  
 Фокусное расстояние (источник-кассета)  $F=800$  мм.  
 – радиографическая плёнка D7 (оптич. плотн.  $D=1,5$ );  
 - - фосфорная пластина Flex HR (уровень  $\approx 20\%$ ).  
 Свинцовый усиливающий экран толщиной  $\delta=0,027$  мм  
 (для фосфорной пластины при  $d \geq 75$  мм -  $\delta=0,1$  мм).  
 $d^{\text{стали}} \leq 21$  мм - РУП-150/300;  $d^{\text{стали}} \geq 30$  мм - MG-420.

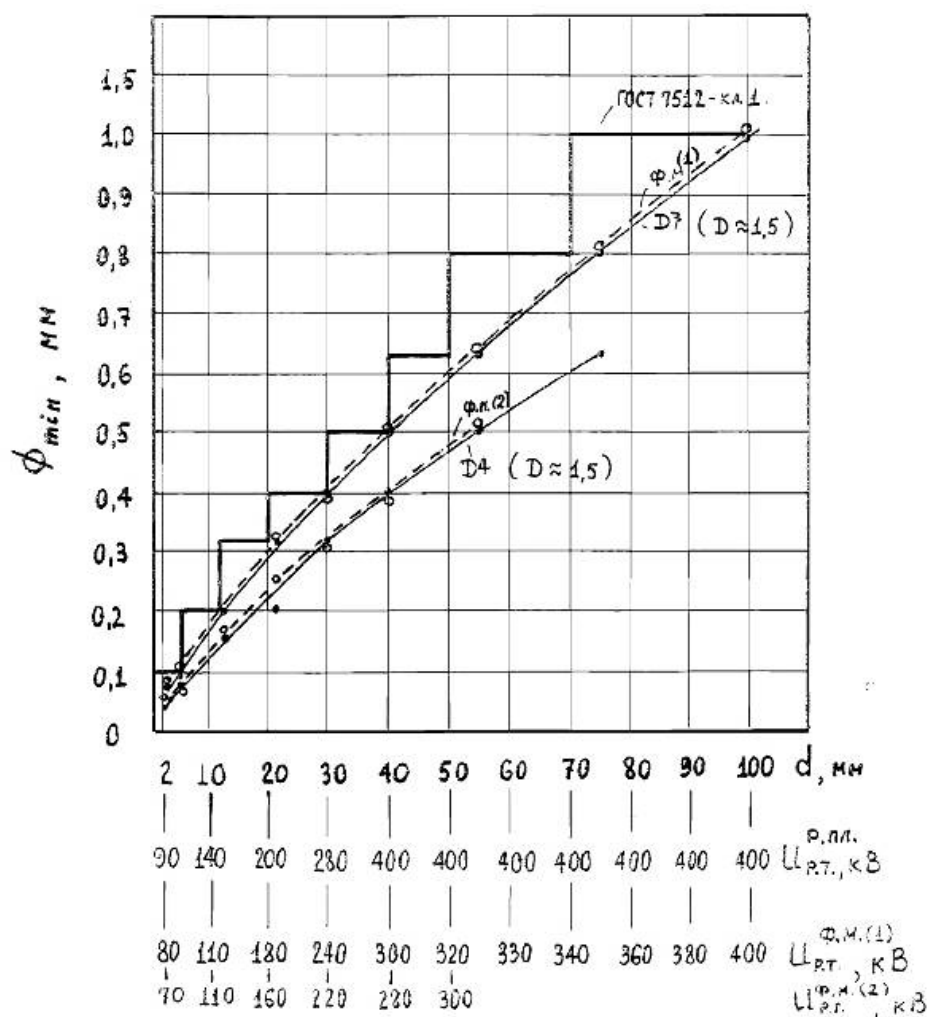


Рис.2. Чувствительность контроля (проволочный эталон) в зависимости от просвечиваемой толщины стали при соответствующем напряжении на рентгеновской трубке (значения  $U$  соответствует ГОСТ 20426-82):  
 – радиографическая плёнка;  
 - - фосфорная пластина Flex HR (уровень серого 20%).  
 Ступенчатая кривая отражает требования к  $\phi_{min}$  для I класса чувствительности по ГОСТ 7512-82

Согласно полученным экспериментальным данным при использовании многоразовых запоминающих пластин вместо промышленных рентгеновских плёнок чувствительность контроля увеличивается, а время экспозиции уменьшается, а, как следствие, повышается производительность и уменьшается дозовая нагрузка на персонал.

Способы сканирования фосфорных пластин. Некоторые из ключевых особенностей комплекса цифровой радиографии с неизбежностью вытекают уже из выбранного способа сканирования фосфорных пластин.

Например, если в процессе сканирования пластина трется своим чувствительным слоем по неподвижной поверхности, как показано на рисунке 8.3, то на рентгеновских изображениях следует ожидать проявления царапин уже после нескольких экспозиций.

Рулонную пластину через такое устройство вряд ли будет возможно пропустить без изломов, вследствие необходимости изгиба вокруг продольной оси.

Сканер с вращающимся барабаном (рисунок 8.2) является компактным и легким, и одновременно исключает даже касание чувствительного слоя пластины при считывании, что многократно увеличивает срок службы пластин. Его недостатком, как и у упомянутой выше модели, является ограничение на размеры сканируемых пластин.

Сканер с вертикальной роликовой протяжкой пластин (рисунок 8.1) позволяет обрабатывать без ограничений пластины любых производимых в настоящее время размеров. Ролики не трутся по поверхности пластины, а катятся по ней, так что повреждения пластин при сканировании случаются крайне редко.

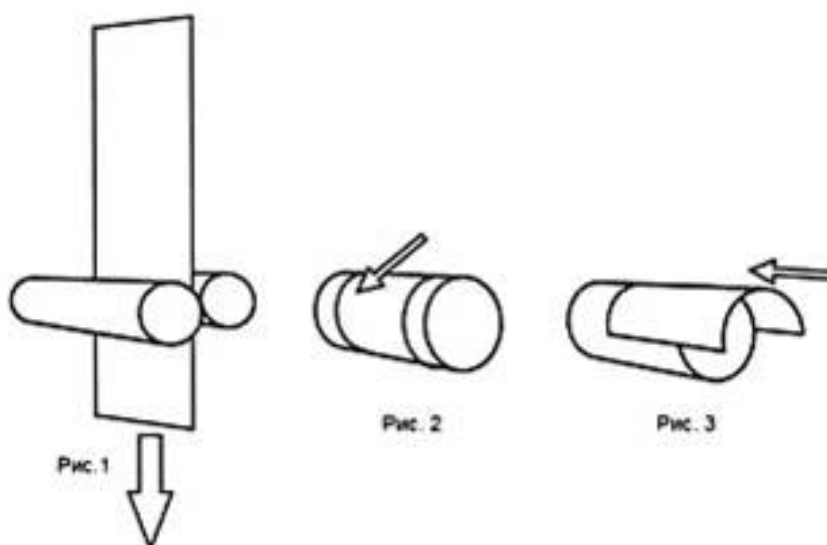


Рис. 8. Способы сканирования

Меры предосторожности.

Для обеспечения высокого качества контроля и долговременной работы комплекса следует придерживаться следующих рекомендаций:

- избегать контакта пластин с любыми источниками влаги;
- избегать механических повреждений поверхности пластин;
- при работе с пластинами, вынутыми из защитных конвертов или кассет, пользоваться хлопчатобумажными перчатками.

Для получения качественных изображений, на поверхности пластин должны отсутствовать загрязнения (пятна, пыль), препятствующие прохождению сканирующего и вторичного излучений.

Основные преимущества системы компьютерной радиографии:

- Исключение затрат на дорогостоящие расходные материалы - радиографическая пленка и химикаты;
- Исключение затрат на процесс химико-фотографической обработки;

- Исключение возможности брака за счет обработки и дефекта рентгеновской пленки;
- Сокращение продолжительности экспонирования и дозовой нагрузки на персонал;
- Расширение возможности радиографического контроля на изделия сложной формы и с большим перепадом толщин;
- Сокращение общей продолжительности контроля;
- Возможность архивирования изображений;
- Возможность передачи изображений на большие расстояния.

Сравнение затрат на расходные материалы при использовании компьютерной и пленочной радиографии представлено в таблицах 2 и 3.

**Таблица 2. Из расчёта на 3 000 экспозиций**

Компьютерная радиография	Средняя цена, руб.	Радиография на плёнку	Средняя цена, руб.
Цена одной многоцветной пластины IP формата 30x40	35 000	Цена 3 000 листов плёнки AGFA NDT D7 NIF формата 30x40	299 880
Дополнительные расходные материалы	0	Дополнительные расходные материалы (из расчёта на обработку 3 000 листов плёнки) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 7,2 комплекта проявителя G135</li> <li>• 10,8 комплекта фиксажа</li> </ul>	19 500 16 800
Итого затрат на 3 000 экспозиций	35 000	Итого затрат на 3 000 экспозиций	336 180

**Таблица 3. Из расчёта на 10 000 экспозиций на одну пластину (гарантированный производителем срок службы многоразовой пластины IP)**

Компьютерная радиография	Средняя цена, руб.	Радиография на плёнку	Средняя цена, руб.
Цена одной многоразовой пластины IP формата 30x40	35 000	Цена 10 000 листов плёнки AGFA NDT D7 NIF формата 30x40	999 600
Дополнительные расходные материалы	0	Дополнительные расходные материалы (из расчёта на обработку 10 000 листов плёнки) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 комплекта проявителя G135</li> <li>• 36 комплекта фиксажа</li> </ul>	65 000 56 000
Итого затрат на 10 000 экспозиций	35 000	Итого затрат на 10 000 экспозиций	1 120 500

### Итоги

Технология цифровой радиографии с применением многоразовых "фосфорных" пластин позволяет:

- исключить «мокрые» процессы фотообработки;
- повысить производительность радиографии в 3 – 7 раз;
- использовать все преимущества компьютерных технологий (цифровую обработку изображений, измерение размеров дефектов, хранение и архивирование результатов).

При этом:

- требования ГОСТ 7512-82 к качеству снимка выполняются в полном объеме;
- дорогая одноразовая серебросодержащая рентгеновская пленка не требуется.

### Литература

1. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник в 2 кн. / Под ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 1986. Кн. 1. – 486 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ Под ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
4. Маслов Б.Г., Ремизов А.Л. Радиационная дефектоскопия. Контроль проникающими веществами. Методические указания к лабораторным и практическим работам. - М.: Изд-во МГТУ, 1992.- 88 с.
5. Маслов Б.Г. Неразрушающий контроль сварных соединений и изделий в машиностроении. - М.: ИЦ «Академия», 2008.- 272 с.
6. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. - М.: Изд-во стандартов, 1983. – 29 с.

## **УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ МЕТРОВАГОНА**

Начаров Дмитрий Сергеевич

*Студент 6-го курса,*

*Кафедра «Технологии сварки и диагностики»*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: А.Л. Ремизов,*

*кандидат технических наук,*

*доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики»*

В России – железнодорожный транспорт является одним из главных способов доставки грузов и перевозки людей. Обеспечение безопасности в движении вагонов является важнейшей задачей в настоящее время.

В данной работе рассматривается проблема УЗК контроля рамы тележки метровагона.

Данное изделие является очень ответственным элементом подвижного состава, т.к. испытывает динамические нагрузки и работает в условиях большого перепада температур.

В настоящее время контроль данного изделия не выполняется в полном объеме. Так же, некоторые методики и технологии контроля являются устаревшими.

При изготовлении ответственных сварных объектов возникает важный вопрос об обнаружении дефектов в сварных швах. Так как небольшой дефект в сварном шве, при сложном напряжённом состоянии, может стать источником развития опасного дефекта – трещины. Поэтому, очень важно обнаружить и исключить потенциальный источник развития трещины на стадии изготовления, в противном случае, это может привести к трагическим последствиям.

Для предотвращения возникновения трещин, необходимо разработать комплексную методику контроля изделия.

В данной работе рассмотрены наиболее опасные сварные соединения, предложены схемы контроля наклонными преобразователями ответственных сварных швов данного изделия, предложены методики экспресс-тестирования.

### **Анализ применяемых соединений и схемы контроля**

Большинство швов, с помощью которых изготовлена рама тележки являются несущими. Подвижная тележка – одно из самых ответственных изделий при производстве вагонов для железнодорожного транспорта, т.к. разрушение сварного шва может привести к аварии с тяжёлыми последствиями.



К сожалению, в настоящее время из 20 различных типов швов рамы тележки контролируется всего 3 типа.

Цель данной работы – повышение выявляемости дефектов и производительности УЗК. Далее рассмотрим соединения и схемы контроля.

### **Втулка тормозного цилиндра**

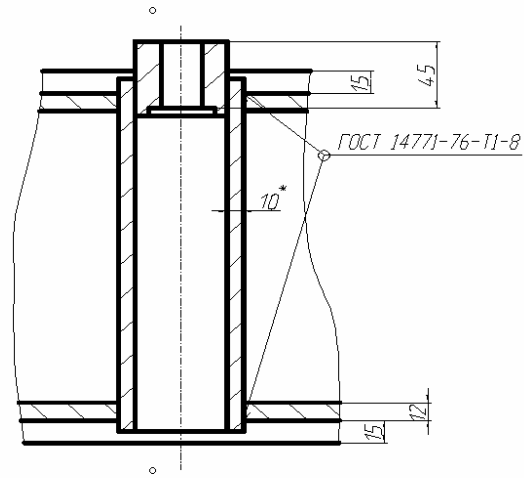
Втулка является непосредственным креплением тормозного цилиндра к раме тележки. (См. Рис.1) Соединение испытывает постоянные динамические нагрузки и поэтому требует ответственного контроля.



(Рис. 1)

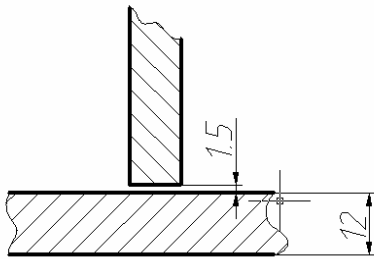
С помощью втулки, непосредственно, крепятся и фиксируются тормозной цилиндр колёсной пары, а также рычаги и прижимы осуществляющие контакт колесной пары с накладками, что обеспечивает торможение всей тележки и подвижного состава в целом.

## Втулка тормозного цилиндра

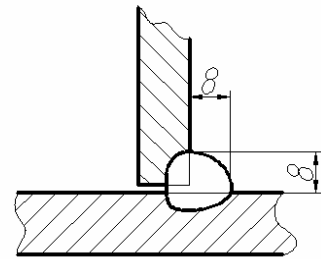


(Рис. 2)

Подготовка кромок:



Сварное соединение:



(Рис. 3)

Вид сверху:



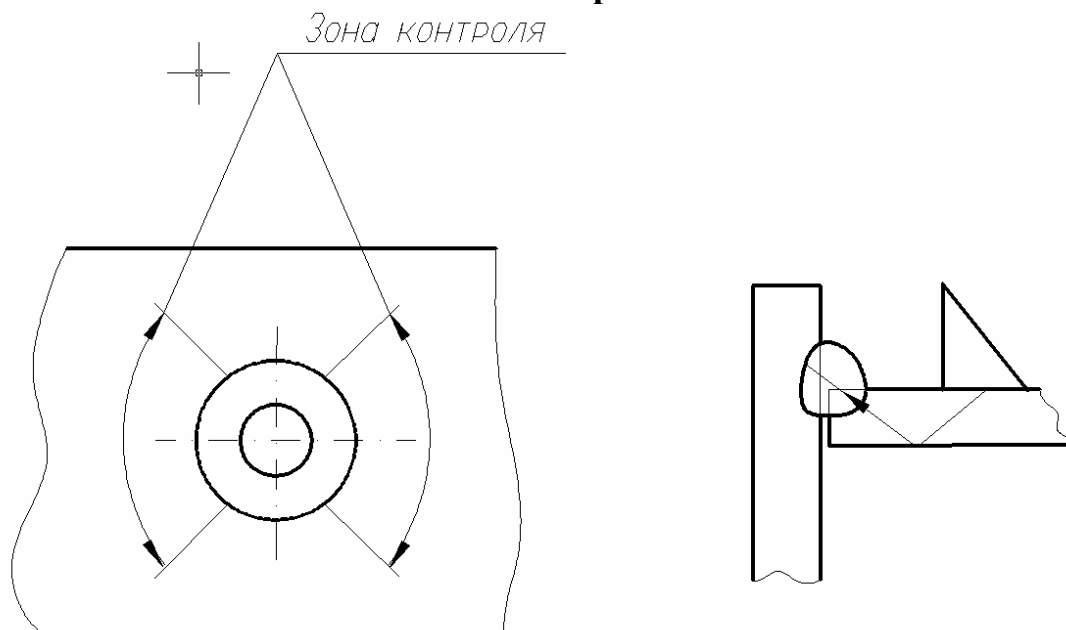
(Рис. 4)

Вид снизу:



(Рис. 5)

### Схема контроля

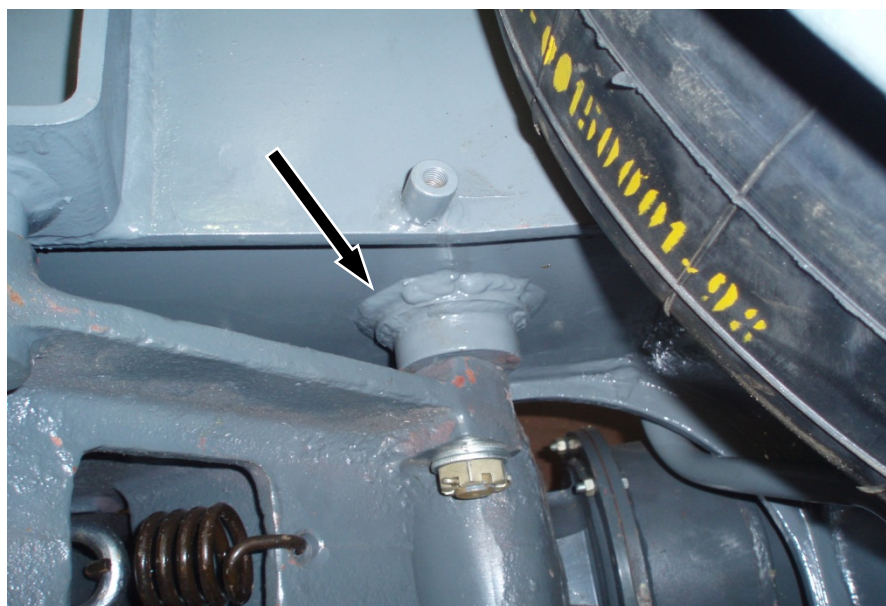


(Рис.6)

Контроль этого соединения производится однократно отражённым лучом. За счёт поперечного перемещения преобразователя, мы контролируем всю ширину шва.

Основной задачей при контроле данного узла, является выявление внутренних дефектов: газа, пор, различных включений.

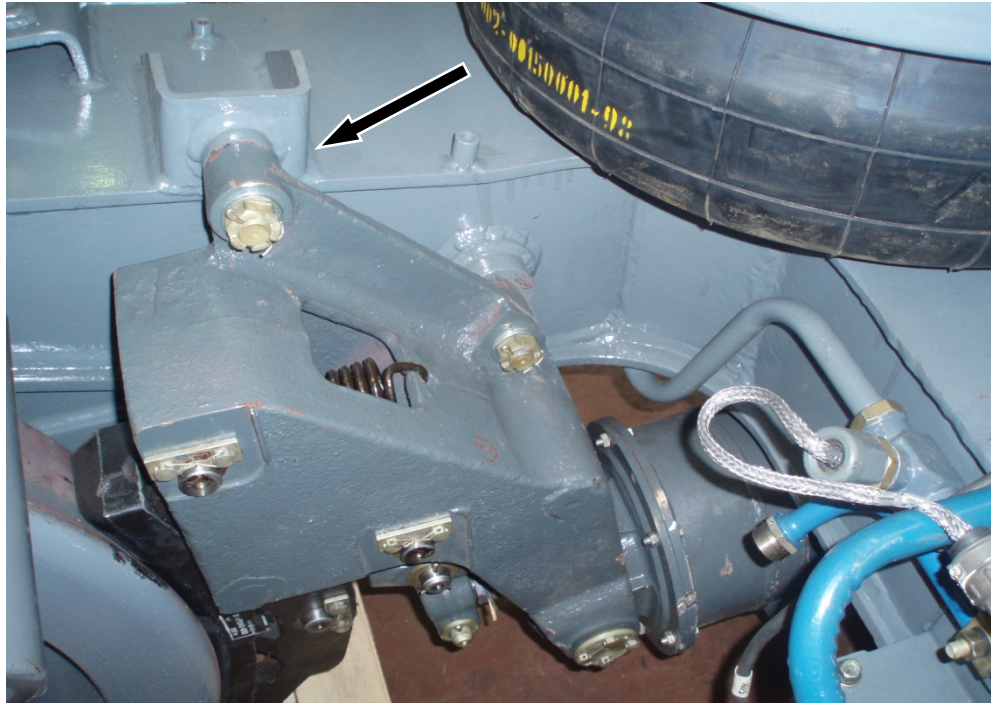
Из-за ограниченной зоны контроля (контроль возможен на двух участках (см. рис. 6), т.к. иначе не получится разместить преобразователь), узел не является полностью дефектоскопичным и требует конструкторской доработки.



(Рис. 7)

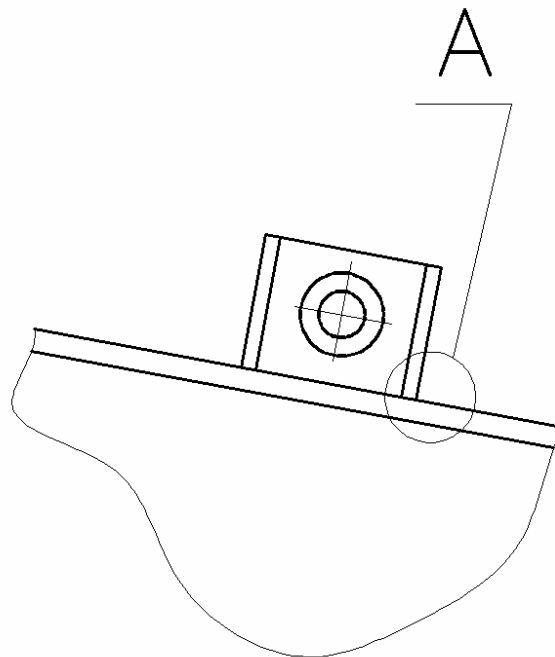
### Кронштейн тормозного цилиндра

Кронштейн так же является непосредственным креплением тормозного цилиндра к раме тележки. (См. рис. 8) Соединение испытывает постоянные динамические нагрузки и поэтому требует контроля.



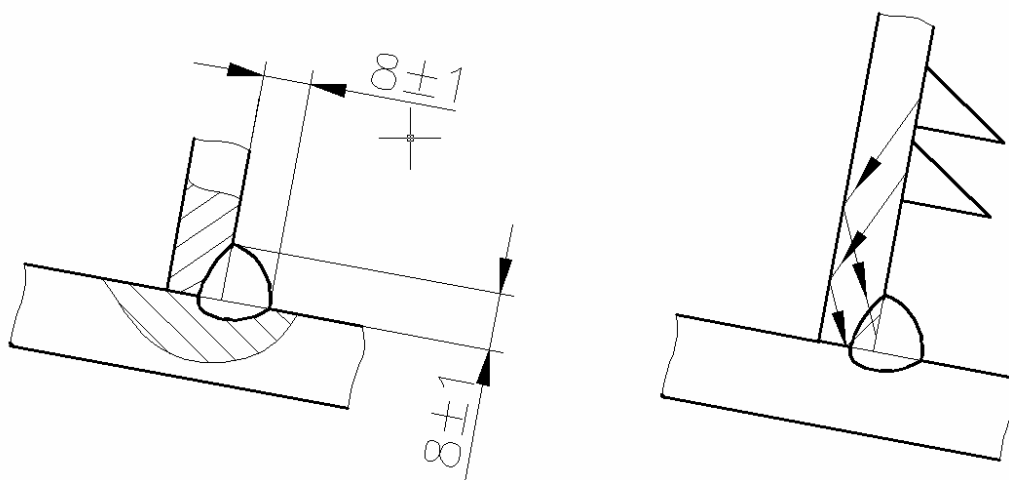
(Рис. 8)

Кронштейн выполнен из трубы прямоугольного профиля (См. рис. 9) и приваривается к поперечной балке угловыми швами с неполным проплавлением.



(Рис. 9)

## A1 (1:1)



(Рис. 10)

Кронштейн тормозного цилиндра узел ответственный. Я предлагаю не выполнять  $\frac{1}{2}$  провара изделия, как это выполняется на производстве в данный момент, т.к. это делает невозможным контроль глубины провара.

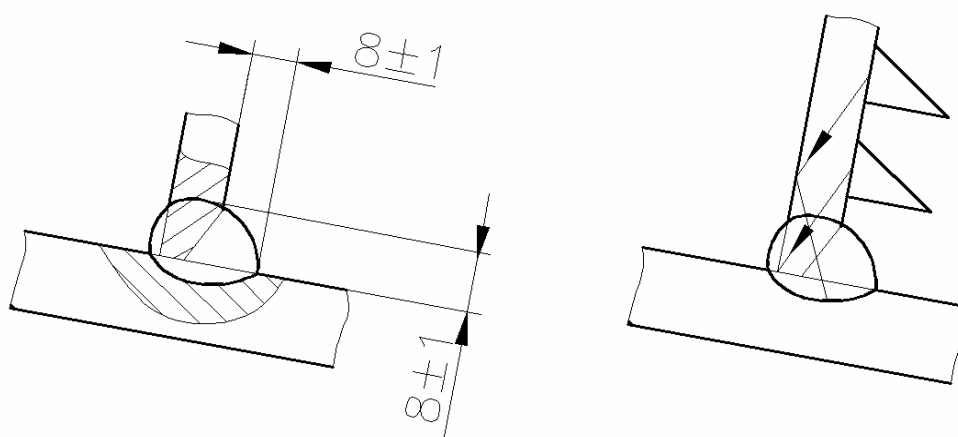
Я считаю, что нужно выполнять разделку кромок и полный провар корня шва. Тогда возможно назначить следующие виды контроля:

- ВИК и УЗК.

Что позволит контролировать провар корня шва.

Далее представлено предложенное мною исполнение:

## A2 (1:1)



(Рис.11)

В данном случае появляется возможность контроля провара корня шва. Соединение продольной и поперечной балки выполненное стыковым швом.

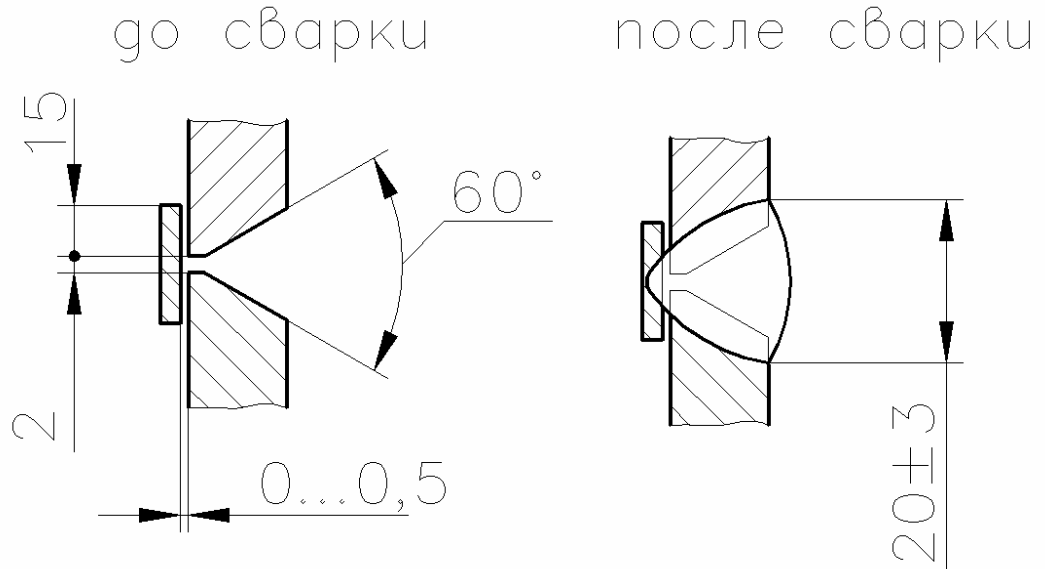
Поперечная и продольная балка - элементы рамы тележки, служат для установки на нее электродвигателя и реактивных тяг. (См. рис. 12)

В процессе эксплуатации поперечная и продольная балки испытывают статические и динамические нагрузки в момент движения вагона.



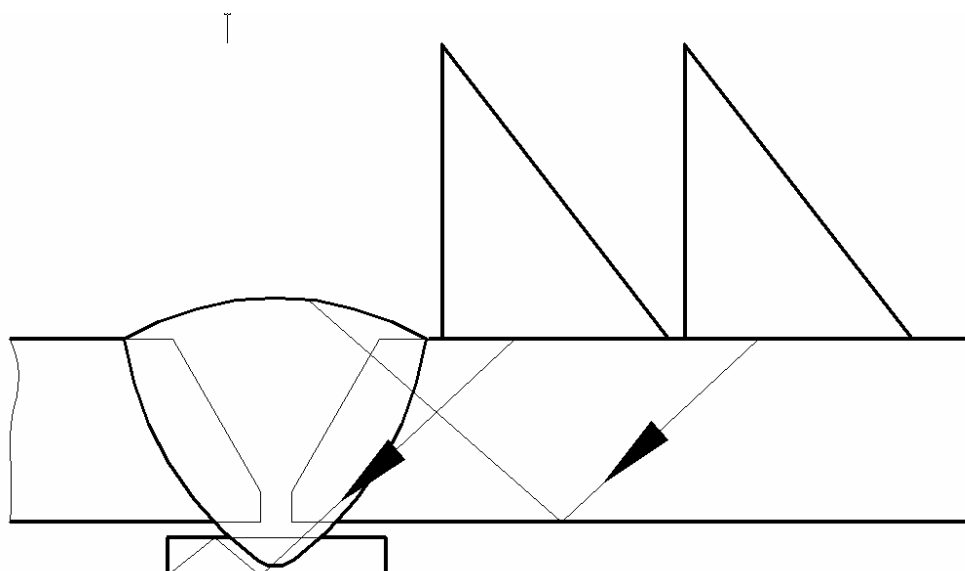
(Рис. 12)

Стыковой шов продольной и поперечной балки является важным соединением в раме тележки. Он выполнен с V-ой разделкой и подкладкой для более качественного проплавления корня шва. (См. рис. 13)



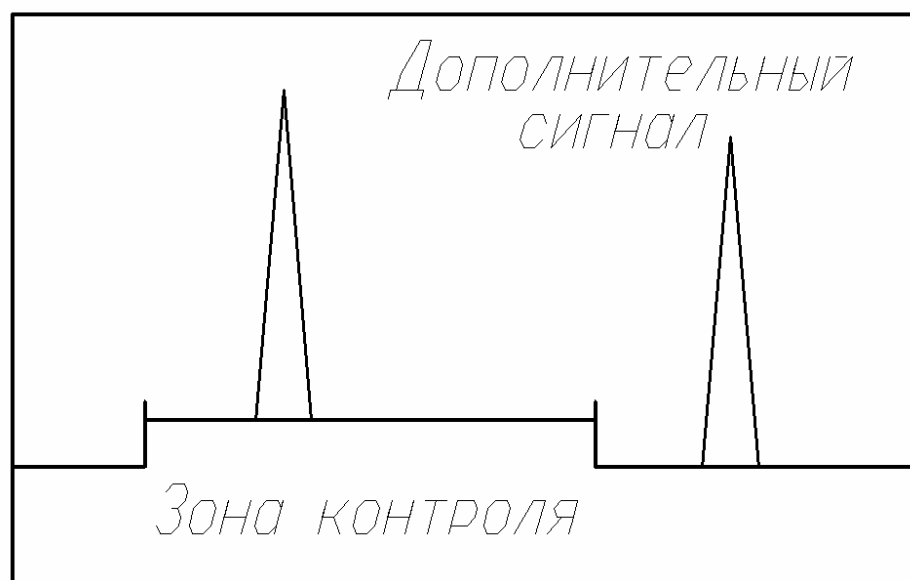
(Рис.13)

По существующей технологии контроль осуществляется прямым и отражённым лучом.



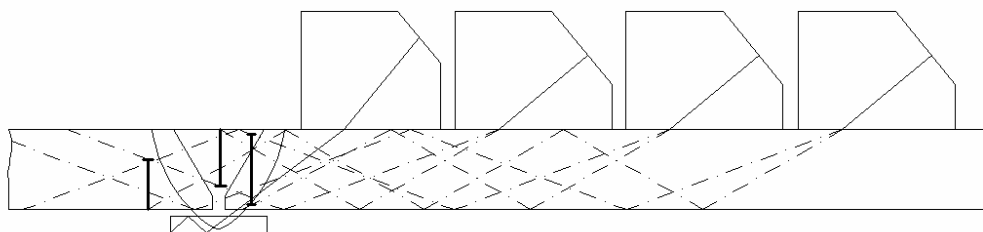
(Рис. 14)

Для того, чтобы проконтролировать проплавление корня шва, предлагается ввести дополнительный служебный сигнал на экране дефектоскопа от угла подкладки. (См. рис. 14,15) Этот сигнал будет на экране дефектоскопа на протяжении всей процедуры контроля только при должном проплавлении. Если при контроле встретится место, в котором проплавление выполнено не надлежащим образом сигнал на экране исчезнет. Таким образом, мы сразу сможем сказать, выполнено проплавление или нет.



(Рис.15)

### Схема механизированного УЗК



(Рис. 16)

Акустическая система должна перемещаться только вдоль сварного шва без поперечного сканирования и иметь систему регистрации и записи.

Очень важным для данного соединения является полное проплавление шва. В связи с этим предлагается в акустическом блоке установить отдельный преобразователь, который будет контролировать корень шва. (См. рис. 16) Ультразвуковая волна, отражённая от угла подкладки, будет формировать соответствующий импульс на экране дефектоскопа, свидетельствующий о проплавлении корня шва. При возникновении непровара корня шва, этот импульс пропадает, сигнализируя о наличии дефекта.

Данная установка позволяет проконтролировать сварной шов по всей высоте без поперечного сканирования преобразователем.

Введение схемы механизированного контроля позволит:

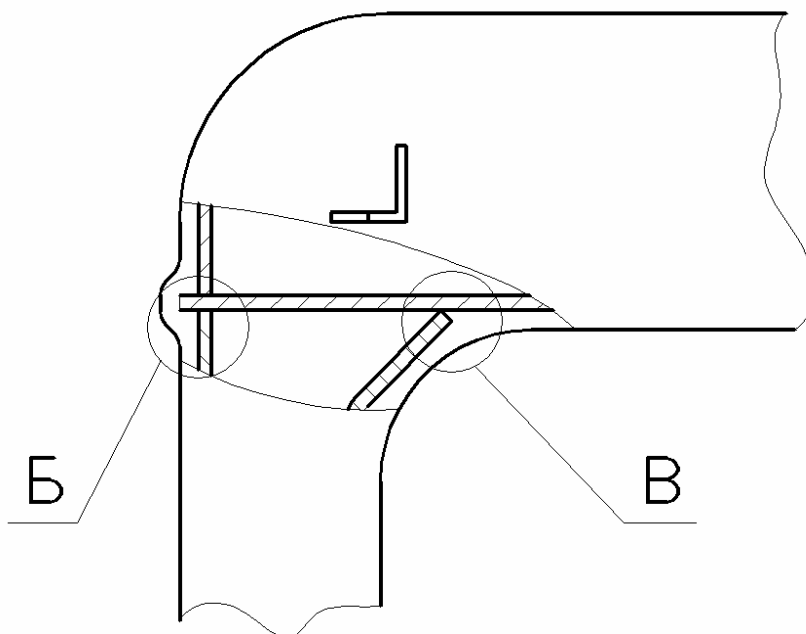
1. Достичь максимальной стабильности качества сварных швов по всей их длине, снижая до минимума человеческий фактор.
2. Понизить квалификационные требования к персоналу за счет введения схемы механизированного контроля и как следствие, уменьшения уровня оплаты труда за данную операцию, тем самым, получая дополнительные сэкономленные финансовые ресурсы, которые можно будет направлять для решения других производственных проблем на предприятии.
3. Улучшить условия труда, избавляя рабочего от лишних физических нагрузок, что снижает его утомляемость и, как следствие, повышает производительность труда.



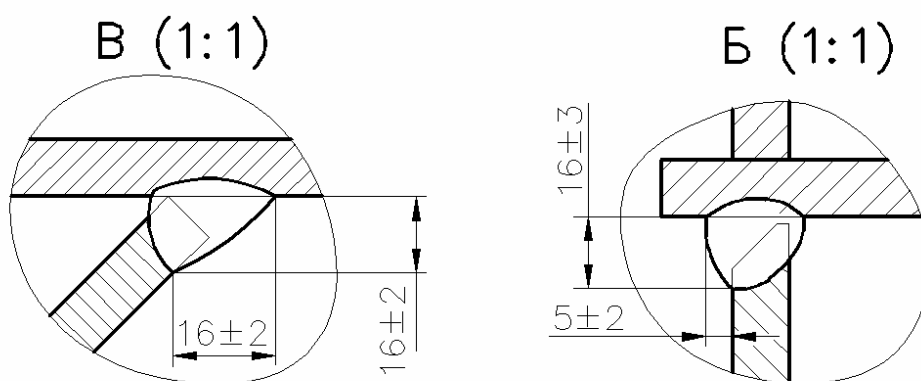
## Соединение продольной и поперечной балки. Рёбра жёсткости коробки.

В процессе эксплуатации поперечная и продольная балки испытывают статические и динамические нагрузки в момент движения вагона.

Рёбра жёсткости выполняют несущую функцию и отвечают за устойчивость всего изделия в целом. (См. рис. 17)



(Рис.17)



(Рис.18)

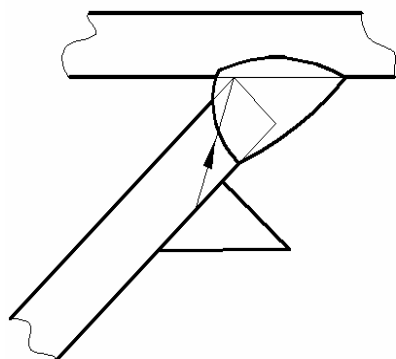
При контроле соединения продольной и поперечной балки, а так же ребра жёсткости коробки, предлагается проводить УЗК в два этапа:

1) Экспресс тест. Даёт быстрое представление о проплавлении корня шва. (См. рис. 19)

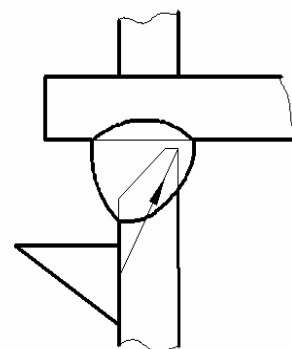
2) Полный контроль (если необходимо). Проверяем сварное соединение на наличие внутренних дефектов. (См. рис. 20)

**Экспресс тест**

В (1:1)



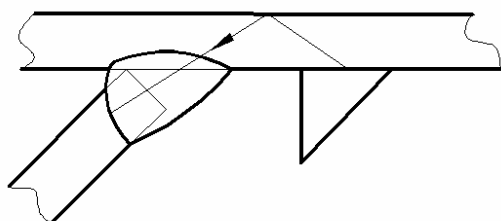
Б (1:1)



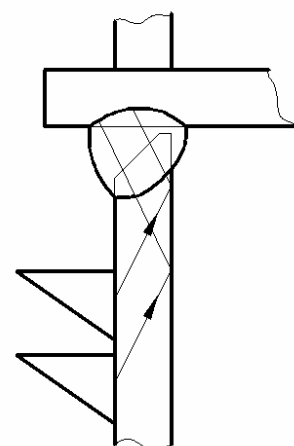
(Рис.19)

**Полный контроль**

В (1:1)



Б (1:1)



(Рис.20)

Преимущества предложенной технологии:

- 1) Увеличение скорости контроля
- 2) Улучшение качества контроля.

### **Вывод**

В результате проделанной работы, были разработаны схемы контроля ответственных сварных соединений, предложены методики экспресс-тестирования, разработано оборудование для механизации контроля.

### **Литература**

1. *В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филинов, и др.; Под ред. В.В.Клюева. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. – М.: Машиностроение, 1995. –488 с., ил.*
2. *Н.П.Алешин. Технологические основы ультразвуковой дефектоскопии. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. –68с., ил.*

УДК 621.791.36

## ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ ПАЙКЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Пьянкова Юлия Александровна

*Студент 5 курса*

*Кафедра «Технологии сварки и диагностики»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Неровный В.М.*

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики»*

Теплообменник как конструкция, обеспечивающая эффективное охлаждение рабочих тел ГТД, находит все более широкое применение в двигателестроении.

По конструктивным решениям теплообменники можно разделить на две группы.

К первой группе относятся пластинчато-ребристые теплообменники. Они изготавливаются из штампованных пластин с определенным шагом и высотой зигов, которые собираются в пакеты. Штампованные пластины соединяются за счет припоя, нанесенного методом плакирования. Для обеспечения жесткости пластинчато-ребристых теплообменников пакеты собираются в жестком каркасе, который одновременно является корпусом теплообменника. Пайка данной конструкции осуществляется в вакуумных печах с общим нагревом.

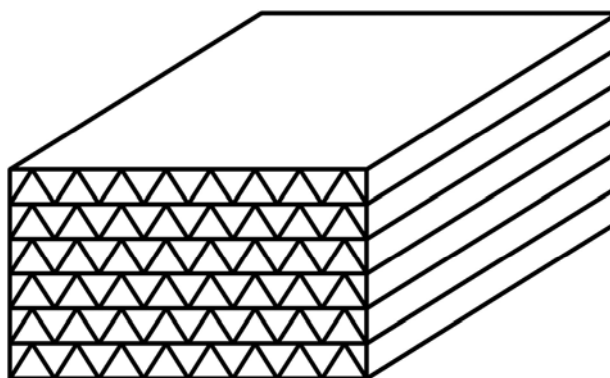


Рис.1. Пластинчато-ребристый теплообменник.

Данная конструкция теплообменников не позволяет производить визуальный контроль качества пайки по всей длине паяных пластин. Поэтому при изготовлении пластинчато-ребристых теплообменников получение даже одного дефекта по паяному шву приводит к браку всего узла.

Ко второй группе относятся трубчатые теплообменники, основным элементом которых изготавливают из трубок диаметром 2 - 5 мм и толщиной стенок 0,2 – 0,5 мм.

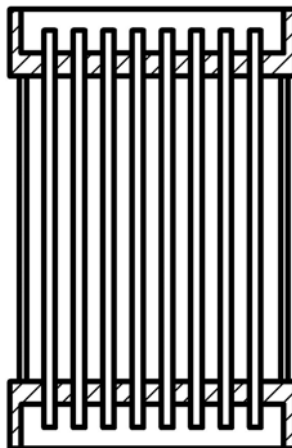


Рис.2. Трубчатый теплообменник

Пайка трубчатых теплообменников осуществляется в печах с общим нагревом в вакууме или в контролируемых газовых средах с применением флюса, а так же сканирующим электронным лучом с ускоряющим напряжением 30 – 60 кВ в качестве локального источника нагрева.

В связи с тем, что в конструкции теплообменника имеется, как правило, от 400 до 600 паяных швов, в первую очередь встает вопрос о качестве паяных соединений.

На качество пайки влияют следующие факторы:

- величина технологического зазора под пайку, между диаметром трубки и диаметром отверстия в трубной доске;
- чистота обработки паяемых поверхностей;
- вес припоя и схема его нанесения;
- физико-химические и механико-технологические свойства применяемого припоя;
- технологические и температурно-временные параметры процесса пайки.

Теплообменник топливо-масляный предназначен для охлаждения топливом масла, циркулирующего в масляной системе изделия АЛ-31Ф, эксплуатируемой во всех макроклиматических районах. Теплообменник по конструктивному оформлению поверхности теплообмена относится к трубчатым.

Основным рабочим элементом теплообменника является сот ТТМ – 419 трубок из стали 12Х18Н10Т диаметром 2 мм и толщиной стенок – 0.2 мм, закрепленные между двумя трубными досками.

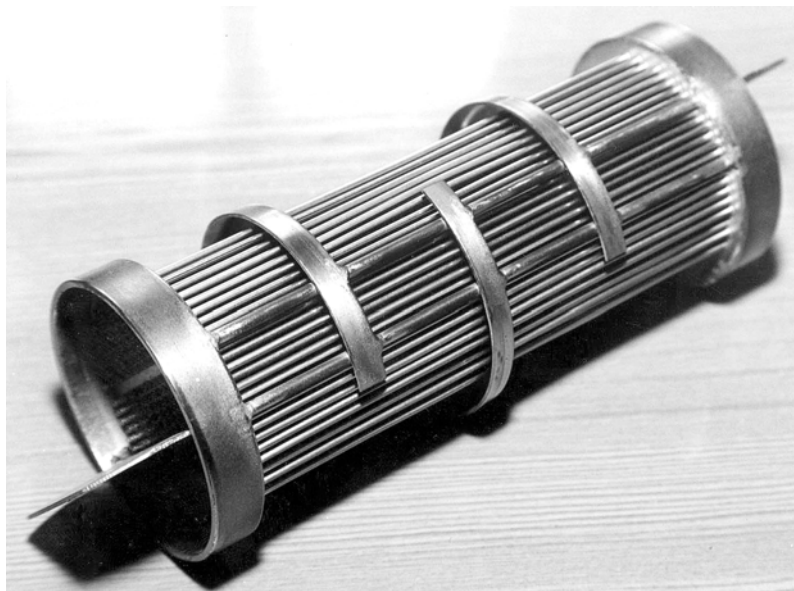


Рис.3. Внешний вид сота.

Для пайки теплообменника из хромоникелевой стали используется порошкообразный припой ВПр2 (припой на медной основе). После нанесения припой закрепляется связующим веществом и, затем, после сушки отправляется в камеру на пайку.

Пайка производится с помощью ступенчатого нагрева, со степенью разряжения  $10^{-3}$  Па.

Для одновременного получения большого количества паяных швов используют ХУ-развертку электронного луча по поверхности, в пределах которой расположены паяные швы. При этом электронный луч с большой скоростью сканирует поверхность детали, являясь по существу квазиравномерным источником теплоты, и обеспечивает требуемый нагрев паемых соединений.

Сущность процесса электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия сформированного в вакууме электронного пучка превращается в тепловую в зоне обработки. Так как диапазон мощности и концентрации энергии в луче велики, то практически возможно получение всех видов термического воздействия на материалы: нагрев до заданных температур, плавление и испарение с очень высокими скоростями. Поэтому важно определить локальные параметры электронного луча: диаметр пятна нагрева, частоту сканирования электронного луча, такие, чтобы при пайке не произошло расплавление основного материала.[1]

Поверхностного источника энергии должны выбираться из условия создания в нагреваемом теле состояния, близкого к температурному равновесию, т.е. такого состояния, когда приток количества тепла в тело становится почти равным количеству отведенного тепла. После достижения равновесного состояния температурное поле сохраняет свой характер. Такое тепловое поле в литературе принято называть «предельным» или «стационарным».

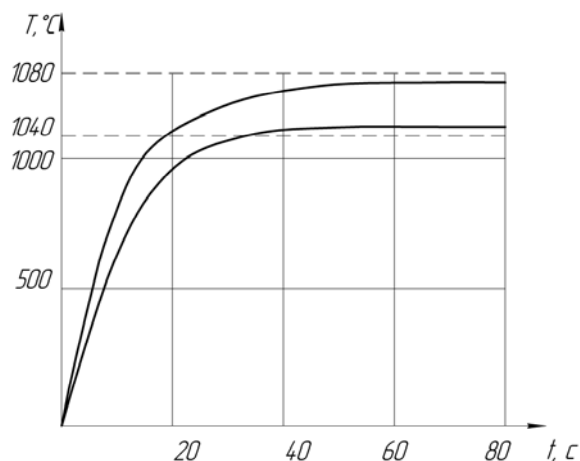


Рис.4. Переход на стационарный режим.

Допустим, что сканирование электронным лучом создает идеальный равномерно распределенный неподвижный источник тепла. При этом пренебрегаем тем, что поверхность теплообменника развита: над поверхностью трубной доски выступают трубки.

При достаточно длительном непрерывном воздействии неподвижным источником энергии на полуограниченные и ограниченные в процессе удаётся получить в них тепловое равновесие, т.е. стационарное температурное поле. Если в полубесконечном теле стационарное состояние достигается благодаря значительному теплоотводу в трёх направлениях, то в тонкостенных телах стационарное поле возможно лишь при наличии теплоотдачи в окружающее пространство. При высокотемпературной пайке в вакууме поверхностная теплоотдача определяется в основном лучистым теплообменом, достигающая значений  $q_r = \varepsilon \cdot \sigma_r (\Delta T)^4 = 7..20 \text{ Вт/см}^2$ , где  $\varepsilon = 0,5..0,8$ ;  $\sigma_r = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2\text{K}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.[2]

Определяющее влияние на характер и эффективность нагрева паяного соединения оказывают тепловые параметры источника энергии (плотность теплового потока  $q_2$ , её распределение по пятну нагрева  $q_2(r)$  и размеры этого пятна). В свою очередь при пайке уровень плотности теплового потока источника зависит от степени равномерности её распределения по пятну нагрева, размеров и формы нагреваемого тела, а также теплофизических свойств металла и глубины прогрева до требуемых температур пайки. Так, например, локальный нагрев до стационарного температурного состояния, удовлетворяющего условиям высокотемпературной пайки в вакууме, тела в виде тонкой пластины в зоне обработки источником тепла с равномерным распределением плотности теплового потока может быть получен при значениях  $q_2 = 2q_r = 14..40 \text{ Вт/см}^2$ .

Для проведения процесса пайки сканируемым локальным источником энергии необходимо, чтобы сканируемый источник обладал требуемой мощностью в сочетании с оптимальной распределенностью тепловых характеристик в зоне нагрева, позволяющих производить нагрев этой зоны до требуемого интервала температур пайки без подплавления основного металла.

Определяем плотность мощности источника тепла с равномерным распределением плотности теплового потока:

$$q_2 = 2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_r T^4 = 2 \cdot 0.8 \cdot 5.67 \cdot 10^{-12} (1.3 \cdot 10^3)^4 = 25.9 \text{ Вт/см}^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon = 0.8$ ,  $T = 1300 \text{ К}$  – температура пайки.

Тогда эффективная мощность источника, необходимая для нагрева до температуры пайки площади  $S = 100 \text{ см}^2$  с учетом КПД  $\eta = 0.85$ :

$$P = \frac{q_2 \cdot S}{\eta} = \frac{25.9 \cdot 100}{0.85} \cong 3000 \text{ Вт} \quad (2)$$

Следующей задачей является определение локальных параметров источника нагрева: диаметр пятна нагрева и распределение в нем плотности мощности. Для простоты берем равномерное распределение энергии в пятне нагрева. Тогда плотность мощности в электронном луче,  $\text{Вт/см}^2$ :

$$q_L = \frac{P}{F_L}, \quad (3)$$

где  $F_L$  - площадь пятна нагрева,  $\text{см}^2$ .

Используя уравнение, описывающее изменение температуры  $T$  в центре пятна нагрева на поверхности тела со временем [1]:

$$T(t) = 2q_2 \frac{\sqrt{at}}{\lambda \sqrt{\pi}} \quad (4)$$

можно оценить значение  $q_2$ , при которой за время  $t$  на поверхности тела достигается температура пайки  $T_n$ . Полагая, что  $T(t) = T_n$  получаем:

$$q_c = 0.885 \cdot T_n \frac{\lambda}{\sqrt{at}} \quad (5)$$

Отсюда, приравнявая к критической плотности мощности значения  $q_c$  плотности мощности  $q_L$  луча с различной площадью пятна нагрева, получаем значение максимального времени, в течение которого на поверхности тела достигается температура пайки:

$$t = 0.621 \left( \frac{T_n}{q_L} \right)^2 \quad (6)$$

Зная диаметр электронного луча, можно определить необходимую скорость его перемещения и частоту сканирования:

$$v = \frac{d_L}{t}, \quad (7)$$

где  $d_L$  - диаметр луча, см.

$$f = \frac{v}{A}, \quad (8)$$

где  $A = 20 \text{ см}$  – амплитуда перемещения луча по паяемой поверхности.

Далее принимая различные значения площади пятна нагрева  $F_L$  от  $0.1 \text{ см}^2$  до  $1 \text{ см}^2$ , в программе MathCAD были построены зависимости  $t(F_L)$  -



время пребывания в зоне пятна нагрева,  $f(F_L)$  - частота сканирования электронного луча (рис. 5,6).

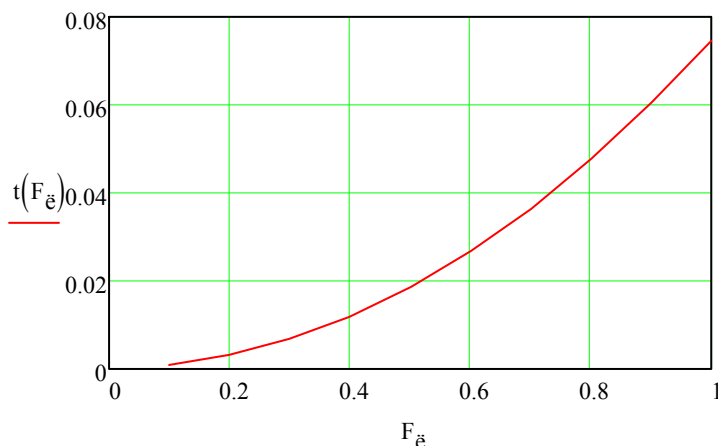


Рис. 5. Зависимость времени пребывания в зоне пятна нагрева от площади пятна нагрева.

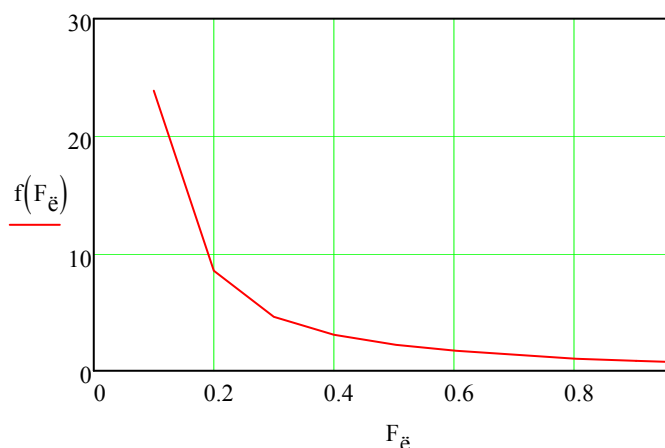


Рис.6. Зависимость частоты сканирования луча от площади пятна нагрева.

Таким образом были выбраны локальные параметры электронного луча:

- $F_L = 0.1 \text{ см}^2$  - площадь пятна нагрева;
- $d_L = 0.36 \text{ см}$  - диаметр луча;
- $t = 0.0007 \text{ с}$  – время пребывания в зоне пятна нагрева
- $f = 24 \text{ Гц}$  – частота сканирования луча.

С уменьшением диаметра электронного луча становится необходимым увеличение частоты сканирования, что избавляет от возможного подплавления трубок теплообменника. Это объясняется тем, что время пребывания в зоне нагрева луча с высокой плотностью мощности сокращается, и температура при этом увеличивается на величину:

$$\Delta T = \frac{t \cdot q_L}{c \cdot \rho} = \frac{0.0007 \cdot 30000}{0.57 \cdot 7.9} \cong 5^{\circ}\text{C}, \quad (9)$$

где  $q_{л} = 30000 \text{ Вт/см}^2$ ,  $c = 0.57 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}$  - теплоемкость стали 12Х18Н10Т,

$\rho = 7.9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  - плотность стали.

Для критериальной оценки параметром электронного луча при пайке теплообменников выбрана схема нагрева пластины равномерно распределенным неподвижным источником тепла. Распределение энергий в электронном луче принято равномерным.

Определены зависимости времени пребывания в зоне пятна нагрева и частоты сканирования от площади пятна нагрева. Выбраны локальные параметры электронного луча.

### Литература

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев и др. - М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.: ил.
3. Электронно-лучевая сварка / Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н.; Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наук. Думка, 1987. – 256 с.

**Секция 9**  
**Оборудование и технологии прокатки**

УДК 669

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМОТКИ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ

Макаров Максим Владимирович

*Студент 5 курса,*

*кафедра «Оборудование и технологии прокатки»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.В. Иванов,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»*

Разработка новых материалов и технологий их получения в настоящее время общепризнано относят к так называемым «ключевым» или «критическим» аспектам основы экономической мощи и обороноспособности государства. Одним из приоритетных направлений является получение субмикроструктурных, нанокристаллических, а также безкристаллических структур в металлах и сплавах. Последняя структура – аморфное состояние твердого тела считается одной из наименее изученных областей физики конденсированного состояния.

Существует несколько методов производства аморфных металлов: испарение металлов в вакууме и их конденсацию на охлаждаемую подложку, распыление путем бомбардировки атомами инертного газа, химическое и электроосаждение, ионная имплантация, быстрая закалка из жидкого состояния (спиннингование) и механическое получение методами порошковой металлургии [1-3].

В России наибольшее распространение получили методы заковки из жидкого состояния. Под таким общим названием объединены методы охлаждения металлов и сплавов с большими скоростями, позволяющими достигать высоких степеней переохлаждения жидкости, иными словами, «замораживать» жидкоподобное состояние. Термовременные интервалы стеклования сплава (рис. 1) ограничены С-образной кривой в координатах « $T$  –  $\tau$ » ( $\tau$  – время), указывающей время, необходимое для начала процесса кристаллизации при различных температурах. Во избежание образования кристаллической фазы охлаждение расплава необходимо провести так, чтобы параметры процесса  $T$  и  $\tau$  оставались за пределами С-образной кривой и к окончанию охлаждения попали в область, лежащую ниже ее.

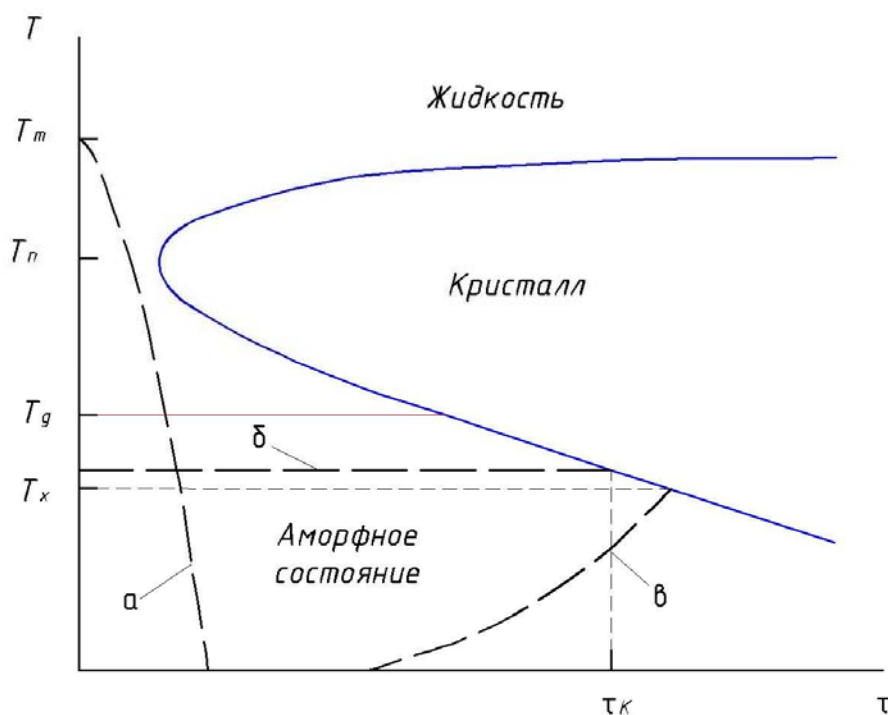


Рис. 1. Термовременная диаграмма процесса образования фаз в переохлажденном расплаве

Методами закалки из жидкого состояния получают аморфные сплавы в виде полосы, ленты, проволоки, порошков. Из лент или полос набирают пакеты необходимой для изготовления изделия толщины. Порошок – удобный материал для изготовления путем прессования деталей, форма которых близка к заданной [1, 2].

Чаще других для промышленного изготовления аморфных металлических сплавов используется метод спиннингования (намораживания), так как аморфная лента является наиболее востребованным продуктом.

Метод спиннингования (рис. 2). Закалка расплава происходит при растекании струи металла по цилиндрической поверхности быстро вращающегося диска-холодильника (линейная скорость обода составляет ~30м/с), выполненного из стали или меди. Аморфная структура сплава формируется в непрерывной ленте или полосе (шириной несколько сантиметров) толщиной 20-80 мкм. Существуют модификации метода, которые позволяют получать полосы повышенной ширины (метод плоской струи), ленты и полосы переменной ширины, а также спиральные ленты и полосы, т.е. изделия с заданным радиусом кривизны. Стремление повысить среднюю скорость охлаждения инициировало разработку разновидности метода - закалки (прокатки) в валках, в которой затвердевающая лента проходит через зазор между двумя вращающимися валками. Это также обеспечивает более высокое качество поверхности ленты.

В России пионером в создании технологии и машин для производства аморфных сплавов является АХК ВНИИМЕТМАШ имени Академика А.И. Целикова.

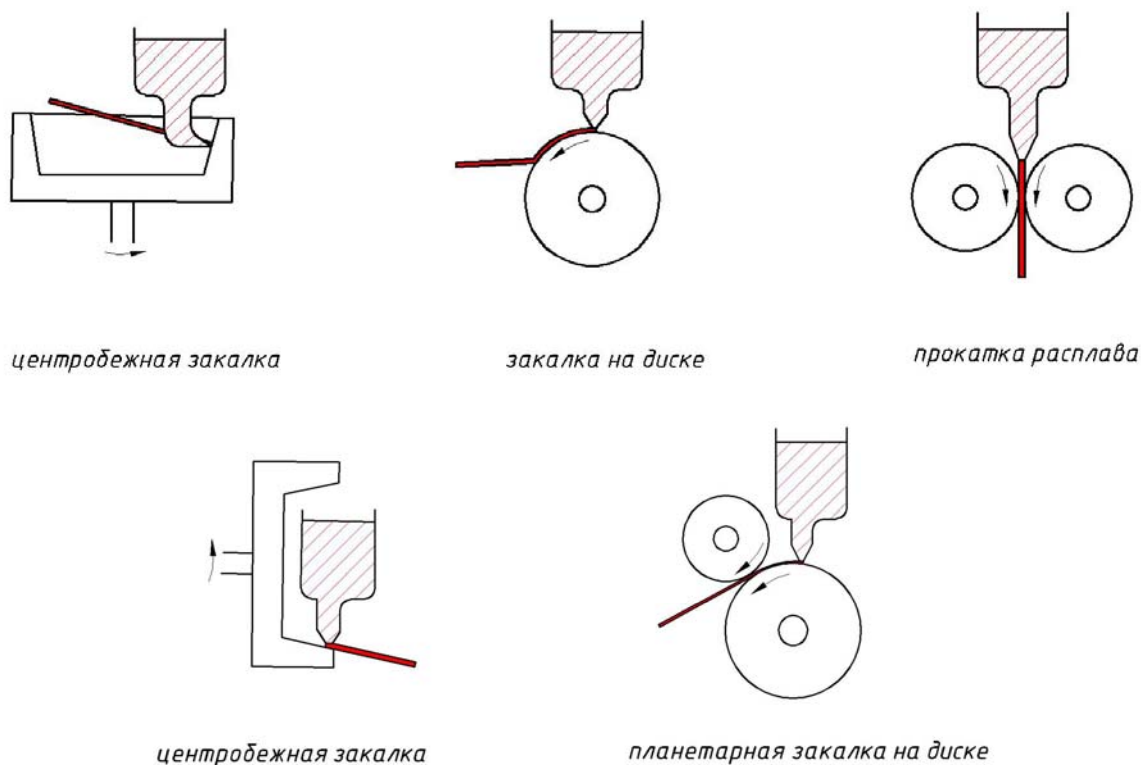


Рис. 2. Схемы получения АМС методом спиннингования

Во ВНИИМЕТМАШ аморфная лента изготавливается методом спиннингования расплава на полированную поверхность охлаждаемого водой валка (диска-холодильника) (рис. 3), движущуюся с линейной скоростью 20...30 м/с. Скорость охлаждения расплава на поверхности валка составляет примерно  $10^6$  °С в секунду.

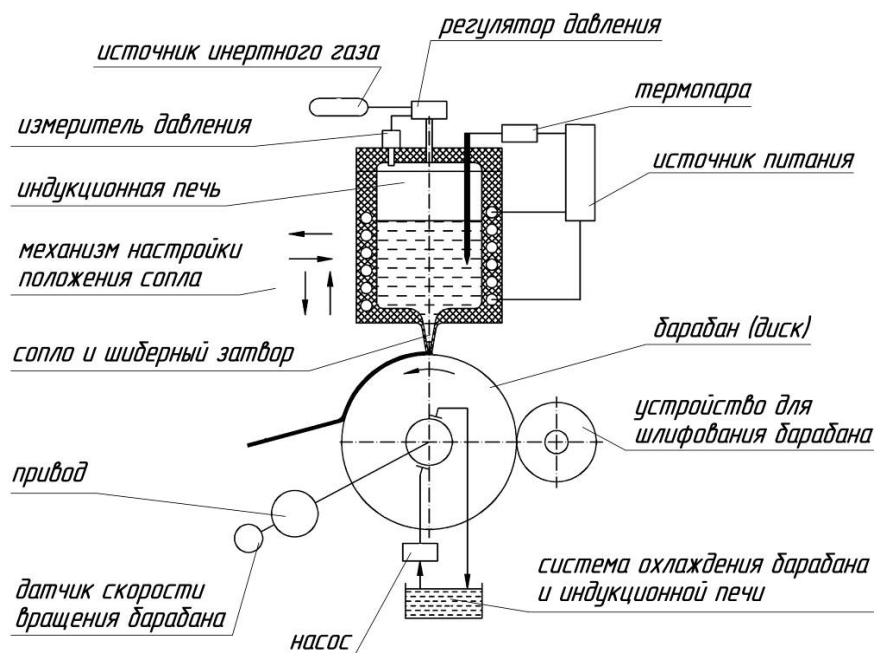


Рис. 3. Схема получения аморфной ленты

Технологический процесс получения аморфной ленты осуществляется в два этапа. На первом этапе в вакуумных индукционных печах выплавляют заготовку – исходный аморфизирующийся сплав необходимого состава, а на втором производится плавление порции заготовки и получение аморфной ленты на машинах разлива.

Порцию исходного сплава в кристаллическом состоянии загружают в плавильный тигель разливочной машины (см. рис. 3) и вторично расплавляют, нагревая до необходимой для разлива температуры и производят разливу. Разливка осуществляется через калиброванную щель разливочного сопла, изготавливаемого из аморфного кремнезема.

Длина щели разливочного сопла определяется шириной ленты, которую надо получить, и обычно находится в пределах от 3,0 до 80,0 мм. Ширина щели составляет 0,45...0,65 мм и является одним из важнейших регулируемых параметров разлива, связанным со многими другими (линейной скоростью движения поверхности разливочного вала, зазором между соплом и поверхностью вала, составом сплава, температурой расплава, давлением газа и другими). Можно, например, отметить, что зазор между соплом и поверхностью вала изменяется в пределах 0,15...0,30 мм с шагом 0,05 мм в зависимости от других параметров разлива.

После расплавления сплава в плавильной емкости разливочной машины и нагрева до необходимой температуры в плавильную емкость подают инертный газ, который выдавливает расплав из плавильного объема к поверхности закалочного вала. Смачивая поверхность вала, расплав движется вместе с ней, формируя на поверхности аморфную ленту. От поверхности вала лента отделяется потоком воздуха, подаваемого на съемник ленты. Съемник устанавливается с зазором от 100 до 300 мкм от поверхности вала.

Управляя расходом расплава через щель сопла путем изменения температуры расплава, ширины щели сопла и величины давления, а также скоростью вращения вала можно управлять процессами формирования ленты. Толщина получаемой ленты зависит от совокупности технологических факторов – температуры расплава, ширины щели сопла, скорости вращения вала, давления газа, физико-химических свойств расплава (вязкость, поверхностное натяжение), материала диска, а также величины зазора между соплом и поверхностью вала и составляет  $25 \pm 5$  мкм.

Изделия, изготовленные из аморфной ленты, требуют проведения обязательной термической или термомагнитной обработки, с помощью которых свойства сплавов можно варьировать в широких пределах. Так, например, в одних случаях получают рекордные значения магнитной проницаемости в узком диапазоне частот, а в других относительно невысокие значения проницаемости, практически не зависящие от частоты в очень широком интервале. Все это позволяет эффективно использовать аморфные ленты из различных сплавов в изделиях разнообразного назначения [4-6].

Однако широкому распространению аморфной ленты препятствует ряд проблем технологического характера. Так, например, высокие скорости

литья, малая площадь поперечного сечения ленты, явное отсутствие зон разлива и съема ленты с диска-холодильника, большая (как правило, более 5000 м) длина ленты затрудняют смотку ленты во время процесса литья на моталку. В связи с тем, что при отсутствии моталки смотка ленты в рулон осуществляется после литья практически вручную, то значительно возрастает трудоемкость процесса, себестоимость продукции, часто происходит разрыв ленты.

### **Технологии смотки аморфной ленты**

Автоматическая смотка аморфной ленты является серьезной проблемой, которая до сих пор не решена. Например, в Японии смотка производится не сразу после схода аморфной ленты с литейной машины. Захват ленты осуществляется со специально подготовленного пола. Большие размеры отполированного пола, позволяют накопить необходимый запас ленты, не спутывая ее. При этом исключается возможность отрыва ленты от зоны разлива.

Во ВНИИМЕТМАШ смотка производится похожим образом. Однако из-за малых размеров цеха и не подготовленной поверхности (в лучшем случае сбор ленты осуществляется на куске картоне) лента может запутаться, что затрудняет полностью автоматическую смотку с пола. Смотка ленты производится 2-3 рабочими, с помощью простейших установок. Они представляют собой электродвигатель с намоточным барабаном на валу. Смотка ведется практически в ручном режиме, т.к. оператор вынужден постоянно контролировать процесс, периодически прерывая его из-за перекосов или спутывания ленты.

ВНИИМЕТМАШем имени Академика А.И. Целиков было предложено провести анализ вариантов конструкций моталок, разработанных российскими и зарубежными конструкторами, представить варианты моталок собственной разработки и выбрать наиболее оптимальную конструкцию для завода ВНИИМЕТМАШ.

### **Обзор возможных конструкций моталок**

#### **Вариант №1 – конструкция фирмы SMS.**

Моталка (рис. 4) содержит оправку, подающий элемент для подачи металлической ленты по касательной к оправке и, по меньшей мере, три установочных элемента, в каждом из которых расположены прижимные ролики с осями для обвода металлической ленты вокруг оправки, причем прижимные ролики расположены вокруг оправки с возможностью подвода к оправке посредством установочных приводов, при этом установочные элементы при подведенных к оправке моталки прижимных роликах выполнены с возможностью поворота вокруг осей поворота, параллельных осям прижимных роликов, причем ось поворота совпадает с осью соответственно самого переднего прижимного ролика или расположена



вблизи нее. Данная моталка обеспечивает возможность легкой и надежной намотки тонких лент, в том числе при высокой скорости намотки. [8]

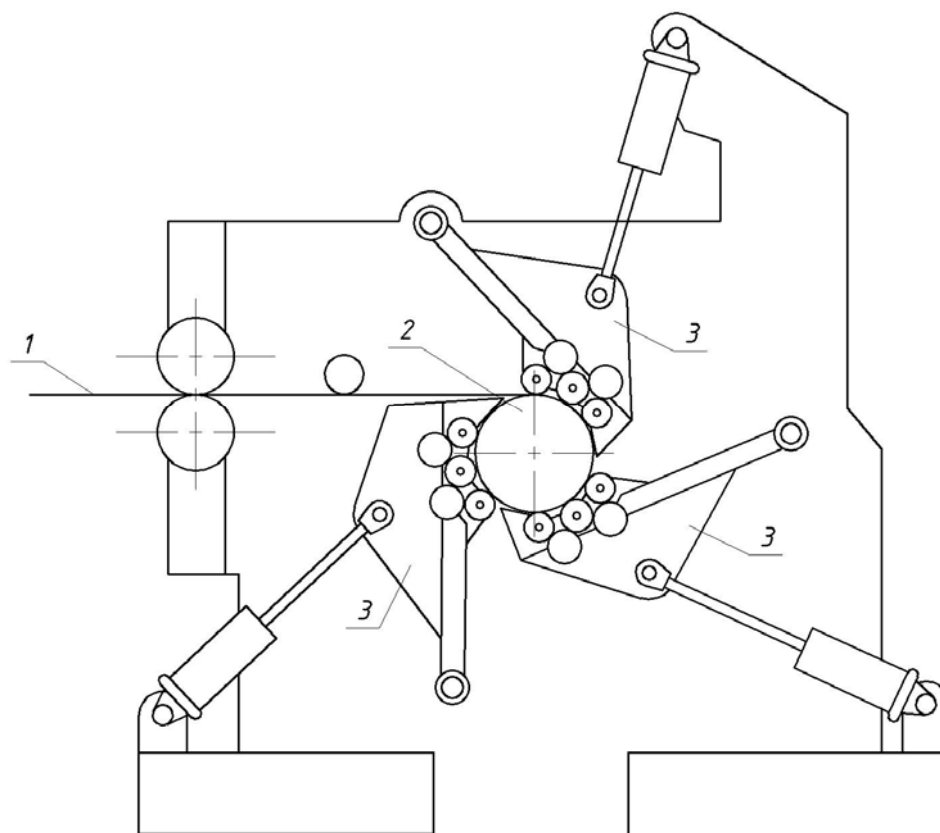


Рис. 4. Общий вид моталки фирмы SMS:  
1 – аморфная лента; 2 – намоточный барабан; 3 – установочный элемент

Основным достоинством данной схемы является возможность смотки в плотные рулоны, без дополнительной перемотки за счет пары натяжных роликов перед намоточным барабаном и установочных элементов. Более того, моталки такого типа используются на листовых станах холодной прокатки.

Главный недостаток – громоздкость и сложность конструкции.

#### **Вариант №2 – пат. № 2116159.**

Устройство для смотки полосы (рис. 5), содержащее корпус, наматывающий барабан и ролики, снабжено магнитным захватным основанием в наматывающем барабане и бесконечной лентой на роликах, размещенной с упругим натягом по дугам рабочего валка и основания наматывающего барабана. Бесконечная лента выполнена из магнетонейтрального материала, а натяжной ролик на выходе из пары бесконечная лента - рабочий валок выполнен с магнитной поверхностью. Ось наматывающего барабана расположена подпружиненно в пазах стойки [9].

Наличие магнитного захватного основания на барабане бесконечной ленты, контактирующей с натягом по дугам рабочего валка и

наматывающего барабана, натяжного ролика с магнитной поверхностью позволяет синхронизировать скорости поверхностей рабочего валка и наматывающего барабана и произвести надежный магнитный захват переднего конца тонкой аморфной полосы, обладающей ферромагнитными свойствами.

На рис. 5. представлено устройство для смотки полосы, общий вид.

Устройство включает: корпус 1, в котором размещены наматывающий барабан 2 с магнитным основанием, бесконечная лента 3 на роликах 4, выходной ролик 5 с магнитной поверхностью, стойка 6, в пазу которой расположена пружина 7, подпружинивающая опору 8 оси наматывающего барабана 2, рабочий валок 9. На чертеже также показаны печь 10, расплавленный металл 11, полоса 12.

На вращающийся рабочий валок 9 из печи 10 льется расплавленный металл 11. Застывшая с большой скоростью тонкая полоса металла 12 увлекается валком и втягивается между бесконечной лентой 3 и рабочим валком 9 по дуге окружности. На выходе из контакта бесконечной ленты 3 и рабочего валка 9 ферромагнитная полоса 12 увлекается магнитной поверхностью натяжного ролика 5 через поверхность магнитонейтральной бесконечной ленты 3 и втягивается в наматывающий барабан 2 с магнитным основанием, к которому притягивается и наматывается. Барабан 2 приводится во вращение бесконечной лентой 3, которая в свою очередь перемещается поверхностью рабочего валка 9. Пружина 7, расположенная в пазу стойки 6, упираясь в опору 8 оси барабана 2, создает необходимый натяг бесконечной ленты 3, обеспечивающий одинаковую скорость поверхности рабочего валка 9, бесконечной ленты 3, полосы 12 и основания барабана 2. Наматываясь на основание барабана 2, полоса 12 увеличивает его диаметр и барабан 2 отжимается бесконечной лентой 3 вдоль паза стойки 6, сжимая пружину 7 опорой оси 8. При этом скорости поверхности основания наматывающего барабана 2, полосы 12, бесконечной ленты 3 и поверхности рабочего валка 9 остаются одинаковыми.

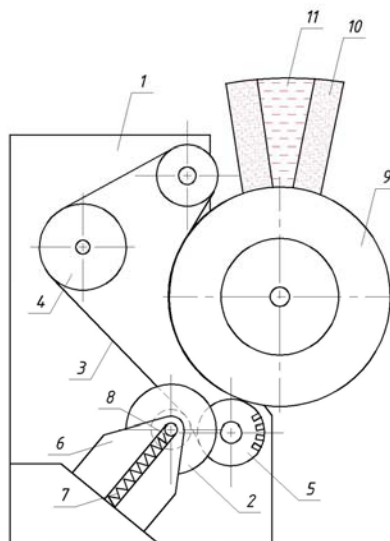


Рис. 5. Общий вид моталки, предложенной в пат. № 2116159

Устройство работает следующим образом.

При умеренных скоростях перемещения ферромагнитной полосы 12 наматывающий барабан 2 с магнитным основанием может сматывать ферромагнитную полосу непосредственно с поверхности рабочего валка 9.

Данная конструкция достаточно компактна и позволяет сматывать плотные рулоны, но ограничивается свойствами материалов. Из-за магнитного барабана можно вести смотку только ферромагнитных материалов.

### Вариант №3 – пат. № 2021075

В моталке, конструкция которой представлена на рис. 6, подачу переднего конца ленты осуществляют по криволинейной проводке, которую затем смещают с образованием зазора относительно прямолинейной проводки, складывают ленту вдвое и осуществляют ее захлестывание на намоточный барабан, после чего производят обрезку переднего конца [10].

Устройство содержит намоточный барабан 3 с захлестывателем 4, подающую проводку 1 и криволинейную проводку 2, последняя установлена с возможностью поворота вокруг центра ее кривизны. Кроме того, передняя кромка криволинейной проводки 2, прилегающая в начальный момент к подающей проводке 1, выполнена заостренной.

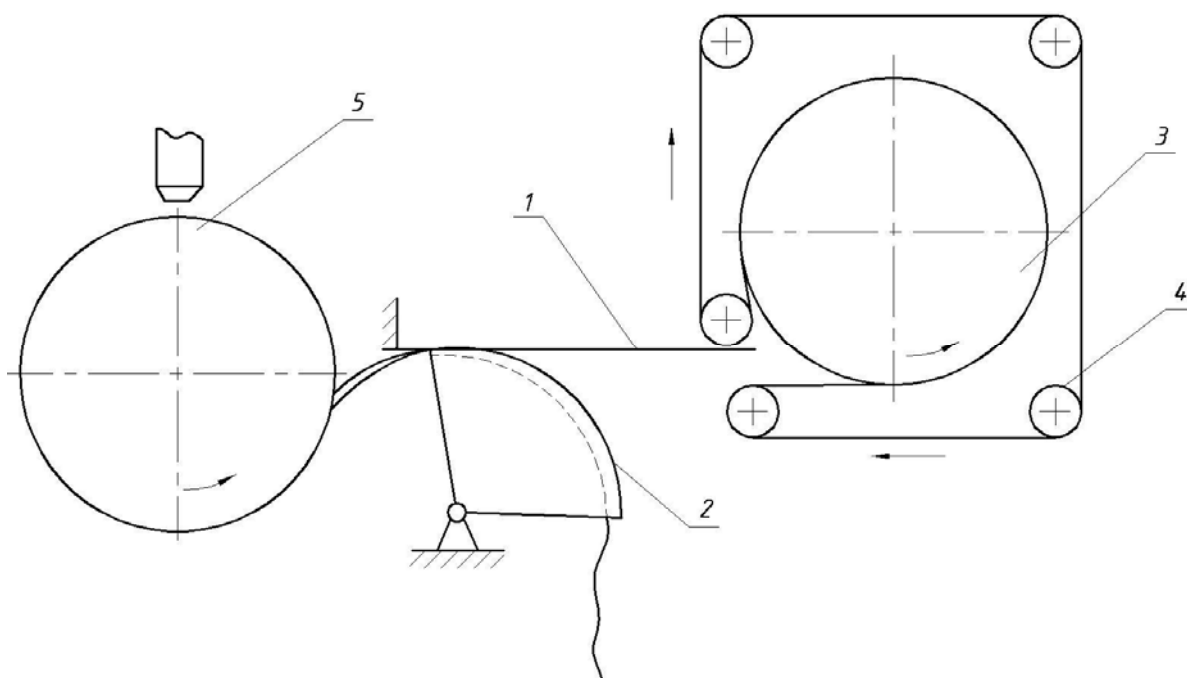


Рис. 6. Общий вид моталки, предложенной в пат. № 2021075

### Вариант №4 – пат. № 2256519

В моталке (рис. 7) реализован способ намотки тонкой ленты посредством намоточного барабана и системы проводок включает подачу

переднего конца ленты в намоточный барабан и захват его на стенке намоточного барабана посредством захватывающего средства. Ленту посредством системы проводок перед входом в намоточный барабан поворачивают примерно на  $90^\circ$  вокруг ее продольной оси, затем передний конец ленты разворачивают и выпускают внутри намоточного барабана в его центральной части таким образом, что кромки ленты были параллельны дну намоточного барабана, а плоскость ленты примерно параллельна его стенке. Передний конец ленты захватывают на внутренней поверхности стенки намоточного барабана посредством захватывающего средства и продолжают намотку ленты в рулон, в направлении от стенки намоточного барабана к его центру до получения рулона требуемого размера [11].

В устройстве система проводок выполнена с возможностью приема ленты с литейного барабана, разворота ленты в  $90^\circ$ , так как обычно ленту производят на литейном барабане с образующей параллельной горизонтали, а стенка намоточного барабана ей перпендикулярна, и подвода ленты внутрь намоточного барабана таким образом, чтобы кромки ленты были параллельны дну намоточного барабана, а ее поверхность примерно параллельна стенке намоточного барабана.

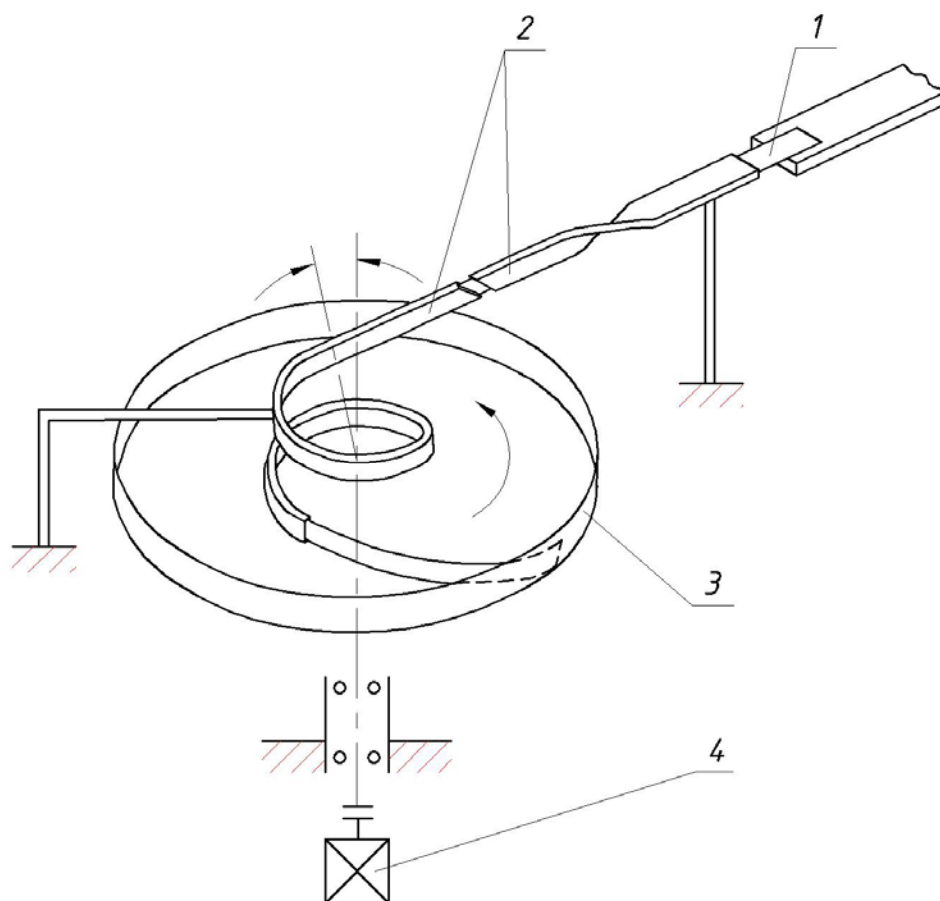


Рис. 7. Общий вид моталки, предложенной в пат. № 2021075:  
1 – аморфная лента; 2 – криволинейные проводки; 3 – намоточный барабан;  
4 – электродвигатель.

Данная моталка позволяет поддерживать скорость вращения намоточного барабана в пределах  $\pm 5\%$  от заданной скорости и таким образом обеспечивает получение рулона тонкой ленты при сохранении технологических свойств аморфной структуры ее материала.

Основными недостатками данной схемы является ограниченность ширины ленты (при изменении ширины необходимо менять проводки) и необходимость дальнейшей перемотки в плотный рулон.

### Анализ вариантов предложенных конструкций моталок и выбор оптимального из них

Для выбора оптимального варианта был проведен анализ по нескольким наиболее важным критериям. Достоинства и недостатки предложенных конструкций сведены в таблицу 1. На основании характеристик процесса производства аморфной ленты во ВНИИМЕТМАШ (таблица 2) выбран наиболее оптимальный вариант, таким оказался вариант описанный в а/с № 1740126

**Таблица 1. Сводная таблица сравнения вариантов моталок**

№ п/п	Критерий оценки						
	Компактность конструкции	Простота синхронизации барабанов	Простота конструкции	Смотка без петли	Плотность смотки	Универсальность захвата	Смотка ленты разных размеров
1	-	-	-	-	+	+	+
2	+	+	-	+	+	-	+
3	+	-	+	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-

**Таблица 2. Основные характеристики процесса производства аморфной ленты во ВНИИМЕТМАШ**

Характеристика	Значение
Объем плавки, кг	50
Ширина ленты, мм	50
Толщина ленты, мкм	25
Длина ленты, м	5200
Скорость вылета ленты, м/с	20-30
Температура разливки, °C	1530
Температура съема, °C	200

### Выводы

1. Аморфные сплавы являются материалами с уникальными свойствами. По мнению компании LiquidMetal, внедрение аморфных сплавов – это третья революция в области материалов, наряду со сталью и пластиком. Применение аморфных сплавов уже сейчас столь обширно, что составляет серьезную конкуренцию остальным материалам [7].

2. Основные ограничения применения АМС сейчас – это высокая стоимость их производства (порядка 33\$ за 1 кг) и отсутствие технологий изготовления больших конструкционных деталей. Разработка технологий снижающих стоимость сплавов на порядок позволят повсеместно использовать АМС вместо обычных сплавов.

3. В России наибольшее распространение получила аморфная лента, необходимая для изготовления витых магнитопроводов и сердечников индуктивных компонентов взамен ферритов, пермаллоев и других магнитомягких материалов, а также для резистивных элементов. Пионером в создании технологии и машин для производства аморфных сплавов является АХК ВНИИМЕТМАШ имени Академика А.И. Целикова.

4. Широкому распространению аморфной ленты препятствует ряд проблем технологического характера. Так, например, высокие скорости литья, малая площадь поперечного сечения ленты, явное отсутствие зон разливки и съема ленты с диска-холодильника, большая (как правило, более 5000 м) длина ленты затрудняют смотку ленты во время процесса литья на моталку. В связи с тем, что при отсутствии моталки смотка ленты в рулон осуществляется после литья практически вручную, то значительно возрастает трудоемкость процесса, себестоимость продукции, часто происходит разрыв ленты.

5. Представлено несколько вариантов решения проблемы

автоматической смотки аморфной ленты. В ходе сравнительного анализа было выявлено, что оптимальным вариантом в условиях ВНИИМЕТМАШ является вариант №2.

### Литература

1. Жукова Л.А. Строение и свойства двойных металлических сплавов в жидком и аморфном состоянии. – Екатеринбург.: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 74 с.
2. Глезер А. М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходства, различия, взаимные переходы // Российский химический журнал. – 2002. Т. XLVI, №5. – С. 57-63.
3. Петров А.Л., Гаврилюк А.А., Зубрицкий С.М. Структура и свойства неупорядоченных твердых тел: Учеб. пособие. – Иркутск.: Изд-во ИГУ, 2004. – 70 с.
4. Осипьян Ю.А., Аморфные металлы и сплавы: Научное сообщение в Президиуме Академии СССР, 1987. – 11 с.
5. Libermann H. and Graham C. (1976). "Production Of Amorphous Alloy Ribbons And Effects Of Apparatus Parameters On Ribbon Dimensions". IEEE Transactions on Magnetics (6): 921.
6. Roya R., A.K. Majumdera (1981). "Thermomagnetic and transport properties of metglas 2605 SC and 2605". Journal of Magnetism and Magnetic Materials 25: 83-89.
7. Интернет ресурс <http://www.liquidmetal.com>
8. Способ альтернативной работы моталок и устройство для намотки лент: пат. 2181312 Рос. Федерация : МПК<sup>7</sup> В21В1/22 / Кнеппе Г., Браун М.; Заявитель и патентообладатель СМС ШЛЕМАНН ЗИМАГ АГ. – №97102192/02; заявл. 13.02.1997 ; опубл. 20.04.2002.
9. Устройство для смотки полосы: пат. 2116159 Рос. Федерация : МПК<sup>7</sup> В22D11/06 / Дикалов Б.А.; Заявитель и патентообладатель Новгородский государственный университет. – № 96100194/02; заявл. 04.01.1996 ; опубл. 27.07.1998.
10. Способ подачи тонкой ленты к намоточному барабану и устройство для его осуществления пат. 2021075 Рос. Федерация : МПК<sup>5</sup> В22D11/06, В21С47/00 / Дунаевский В.И., Запара Б.М., Смычков А.С., Некраш Э.Б., Гридневский В.И.; Заявитель Украинский науч.-исслед. институт металлургического машиностроения – №4844223/02, патентообладатель – Филиал ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова; заявл. 29.06.1990 ; опубл. 15.10.1994.
11. Способ намотки тонкой ленты в рулон и устройство для его осуществления пат. 2256519 Рос. Федерация : МПК<sup>7</sup> В21В47/00 / Некипелов В.С.; Заявитель и патентообладатель Некипелов Владимир Станиславович. – №2004103270/02, заявл. 05.02.2004 ; опубл. 20.07.2005.

УДК 621.771

## ПОЛУЧЕНИЕ КРУГЛЫХ ПРУТКОВ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭИ698

Жанзаков Павел Кабдукалиевич<sup>(1)</sup> Артёмов Фёдор Евгеньевич<sup>(2)</sup>, Бондаренко Александр Константинович<sup>(3)</sup>,

*Инженер-технолог Зк<sup>(1)</sup> Инженер-технолог<sup>(2)</sup>, Инженер-технолог<sup>(3)</sup>,  
Отдел обработки металлов давлением  
Научно-исследовательский институт технологии и организации  
производства двигателей*

*Научный руководитель: И.А.Бурлаков,  
доктор технических наук, начальник отдела обработки металлов давлением*

### Введение

Предприятия авиакосмического комплекса используют в производстве прутки широкого спектра как по маркам высоколегированных сталей и титановых, никелевых сплавов, так и по диаметральным размерам. Количество марок сталей и сплавов, используемых отраслью, превышает 20 наименований, а диапазон наиболее широко используемых диаметров ~ от 5 до 40 мм. До настоящего времени предприятия авиакосмического комплекса, приобретая у металлургических заводов прокат несоответствующего диаметра, вынуждены производить детали или заготовки для последующего производства по затратной технологии – путем съема до 60...100% дорогого материала механической обработкой.

НИИД были проведены опытно-технологические работы по получению прутков необходимого размера на прокатном комплексе «280-380» и разработаны технологические процессы прокатки прутков, внедренные в производство.

### Получение прутков круглого сечения из никелевого сплава ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ)

#### Перекатка прутков

Перекатываемые за один раз прутки должны быть одной марки сплава, одной партии, одной плавки. На поверхности прутков не должно быть плён, трещин, рванин, закатов, шлаковых включений, чернот прокатанного металла.

Химический состав никелевого сплава ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ) приведен в таблице 1.

Исходные прутки по механическим свойствам и длительной прочности отвечают требованиям ТУ14-1-1977.



**Таблица 1. Химический состав никелевого сплава ЭИ698-ВД**

Документ	Химический состав в %									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	V	Mo	
сертификат	не более				0,006	14,28	Осн.	0,12	2,91	
	0,05	0,15	0,25	0,005						
Продолжение										
	Fe	Ti	Al	Cu	Nb	B	Sb	Sn	Bi	As
сертификат	0,6	2,65	1,65	0,02	2,08	0,008	не более 1 балла по шкале спектрального анализа			

Линия калибровки допускает степени деформации не более 20%. Исходный пруток прокатывался последовательно во всех калибрах до минимального диаметра. Диаметр исходного прутка – 32 мм.

Диапазон прокатки сплава ЭИ698-ВД лежит в пределах от 1180 °С до 1030 °С, т.е. интервал прокатки составляет 130 °С. В данном температурном диапазоне предел прочности материала  $\sigma_b$  меняется от 5,1 на верхней границе диапазона до 11,2 МПа на нижней. За один нагрев допускается 15...20% деформации.

Т.к. по паспортным данным печи равномерность температурного поля в зоне нагрева  $\pm 10$  °С, нагрев прутков в печи производился при температуре 1170 °С  $\pm 10$  °С, скорость прокатки составляла  $\sim 0,5$  м/сек.

В дальнейшем режимы нагрева заготовок были скорректированы и представлены во временных технологических рекомендациях. Согласно рекомендациям, нагрев исходных заготовок необходимо проводить по режиму: садка прутков в печь, предварительно нагретую до температуры 1160  $\pm 10$  °С; подогрев - 10 мин после выхода печи на температурный режим; продолжительность выдержки при температуре деформации – 1 мин на 1 мм диаметра, но не менее 15 мин. Максимальное время пребывания в печи сверх минимального при температуре деформации – 0,7 мин на 1 мм диаметра, но не менее 20 мин. Межоперационный нагрев прутков проводился по режиму: садка прутков в печь, предварительно нагретую до температуры 1160  $\pm 10$  °С; время пребывания заготовок в печи при температуре деформации – 1 мин. на 1 мм диаметра.

Оптимальные технологические параметры приведены в сводной таблице 2. обозначение размеров см. на рис. 1, месторасположение прокладок, проставок и прижимов показано на рис. 2.

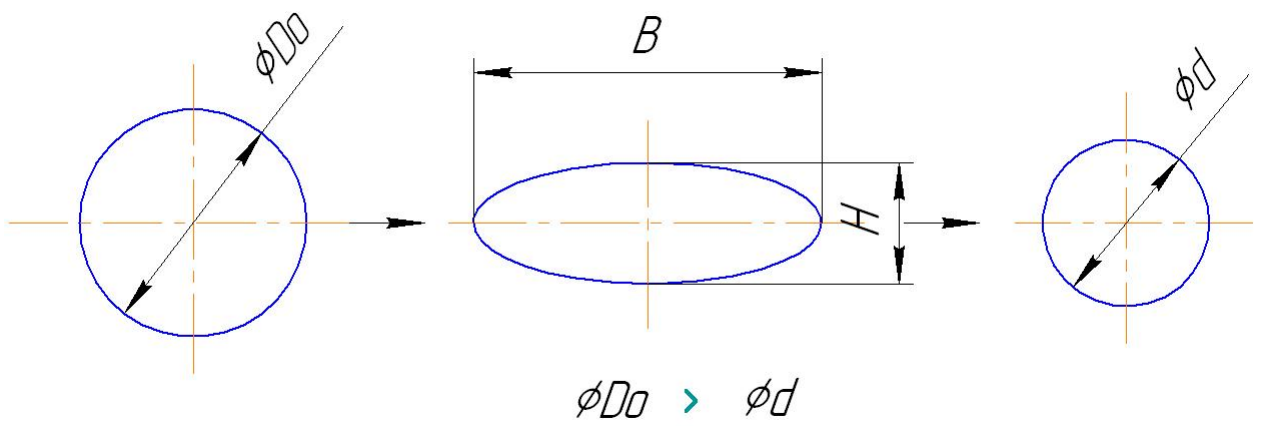


Рис. 1 Система круг-овал-круг

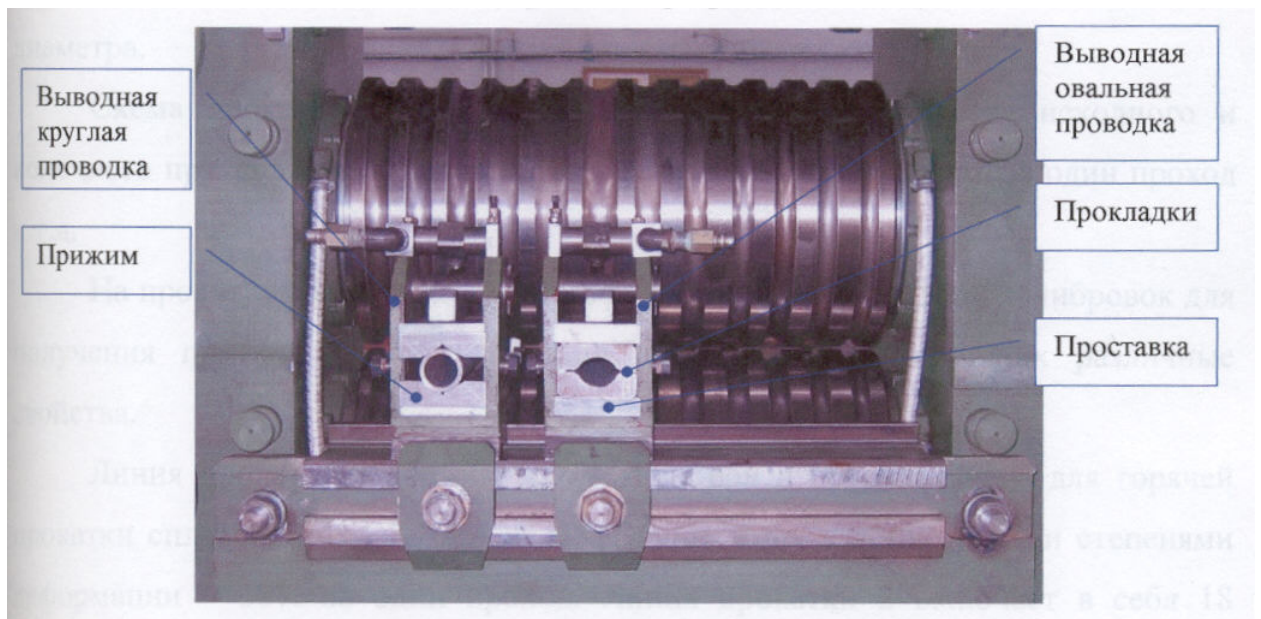


Рис. 2 Валковая арматура

Технические характеристики двух линий рабочих клеток 280 и 380 прокатного стана представлены в таблице 2.

**Таблица 2** Техническая характеристика двух линий рабочих клетей прокатного комплекса

№ п.п.	Наименование параметра	Величина
1	Исходная заготовка диаметр, мм длина, мм масса одной заготовки, т <sub>мах</sub> , кг масса пакета, загружаемого в печь, кг	38, 36, 26 0,6...1,7 ~ 20 80...100
2	Диаметр выпускаемого проката, мм: в клетях 380 в клетях 280	32...18 17...6,5
3	Длина прокатного прутка, т <sub>мах</sub> , м	2...2,3
4	Скорость прокатки, м/с	0,2...1,0
5	Частота вращения валков, т <sub>мах</sub> , об/мин в клетях 380 в клетях 280	50 70
6	Наибольшее усилие прокатки, тс в клетях 380 в клетях 280	100 46
7	Наибольший момент прокатки, тс <sub>м</sub> в клетях 380 в клетях 280	3,7 1,2
8	Мощность электродвигателя привода клетей, кВт  «380» «280»	  110 55
9	Масса оборудования клетей, т клеть 380 в сборе клеть 280 в сборе клеть 380 в сборе с валковой арматурой клеть 280 в сборе с валковой арматурой	6,7 3,5 ~ 6.8 ~ 3,6

**Таблица 3. Сводная таблица технологических данных по перекалке прутков из никелевого сплава ЭИ698-ВД с Ø32 на Ø12 мм**

Исх Ø, мм	D <sub>0</sub> (H <sub>0</sub> ) мм	B <sub>0</sub> , мм*	h <sub>i</sub> (d <sub>i</sub> ) , мм	B <sub>i</sub> , мм	№ калиб ра	Проводк и: вводная выводна я	Прокладк а/ Проставк а	Зазор валко в, мм	Примечан ие
<b>Клеть 380-2</b>									
36	36	36	34,1	37, 1	3,1	1А1	4/10	3,9	
						3В1	6/23		
	37, 1	34, 1	34,9	34, 6	3,2	3А2	4,5/-	1,4	
						3В2	Прижим Н30 /10		
32	31, 7	32	26,2	33, 8	3,5	1А3	-/-	1,3	
						3В5	-/25		
	33, 8	26, 2	28,9	28, 8	3,6	3А6	-/-	1,2	
						3В6	Прижим Н30 /15		
28,5	28, 4	27, 5	23,9	30, 8	3,7	1А5	6,5/10	1,2	
						3В7	-/23		
	30, 8	23, 9	26,3	26, 1	3,8	3А8	4,5/-	1,2	
						1В4	Прижим Н30 /15		
26	25, 9	25, 1	21,4	28, 6	3,9	1А5	4/10	1,2	
						3В7	-/25		
	28, 6	21, 4	23,6	23, 8	3,10	3А8	-/-	1,2	
						1В4	Прижим Н30 /15		
23,5	23, 8	23, 5	19,6	25, 3	3,11	1А5	-/10		
						3В11	-/25		
	25, 3	19, 6	21,5	22, 3	3,12	3А12	-/-		
						1В6	Прижим Н30 /15		
<b>Клеть 280-3</b>									
21,5	21, 3	21, 2	18,9	23, 8	3,13	1А7	5,5/-	0,8	Заготовки заходят
						1В9	10/6		

									туго
	23,8	18,9	20	19,6	3,14	1А10,1	10,5/-	0,8	Заготовки заходят туго
						1В8	Прижим Н30 /-		
19	20	19,9	15,9	21,2	3,15	1А7	4/-	0,8	
						1В9	8/7		
	21,2	15,9	17,8	17,8	3,15	1А10,1	8/-	0,8	
						1В8	Прижим Н20 /-		
17,5	17,8	17,8	14,9	19,3	3,17	1А7	-/-	0,8	
						3В17	5/8,5		
	19,3	14,9	16,2	16,2	3,18	3А18	5,5/-	0,8	Проводку 1В8 зажимает
					1В8	Прижим Н20 /-			
16	16,2	16,2	13,3	17,7	3,19	3А11	4/-		
						3В17	3,5/9,25		
	17,7	13,3	14,7	14,8	3,20	3А18	3,5/-		Задний конец круга свалился
						1В10,1	Прижим Н20 /-		
14,5	14,9	14,7	11,9	16,3	3,21	1А11	3/-	0,8	
						3В7	-/10		
	16,3	11,9	13,5	13,5	3,22	1А10,2	3,5/-	1	Круг свалило (лампас на конце)
					1В10,1	Прижим Н20 /-			
13	13,3	13	11,4	14,4	3,23	1А23	-/-		
						3В17	-/10		
	14,4	11,4	12,6	12,4	3,24	вводная роликовая коробка 4А3.2.1	-/-	1	Свалило конец
						1В10,1	Прижим Н20 /-		

\* Размеры поперечных сечений, за исключением исходных диаметров, приведены для горячих прутков.

В процессе опытных прокаток проявился один из недостатков калибровки овал-круг: сложность удержания овальной полосы при прокатке ее в круг. При малых деформациях (до 10%) задний конец овала сливается и

образуется дефект типа «лампас» рис. 3а. Чтобы этого избежать, вводную арматуру необходимо делать более жесткой, по максимуму уменьшая зазор между полосой и проводками скольжения, либо использовать вводные проводки другой конструкции (например, роликовые). Носик проводок нужно помещать максимально близко к калибру, чтобы происходило минимальное сваливание свободного конца после его выхода из проводок в очаг деформации. Кроме того, во избежание дефекта типа «змейка» рис. 3в вследствие колебательных движений прутка из-за передачи крутящего момента при прокатке столь круглой овальной полосы, необходима тщательная регулировка рабочих валков в осевом направлении.



а)



в)

Рис. 3 Дефекты: «лампас» - а; «змейка» - в.

В прокатке столь круглой овальной полосы, необходима тщательная регулировка рабочих валков в осевом направлении.

### Исследование прокатанных прутков

После проведения стандартной термообработки в печи с воздушной атмосферой по принятому на заводе режиму (закалка 1100°C - выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе; закалка 1000°C – выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе; старение 775°C – выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе), свойства сплава по механическим свойствам, длительной прочности и макроструктуре соответствует ТУ 14-1-1973.

Геометрические размеры круглых прутков проверялись штангенциркулем. Проводились замеры прутка в одном поперечном сечении с поворотом на 90° в трех местах по длине прокатанного прутка. Средние значения представлены в таблице 3. По результатам замеров выявлено, что по длине прутка размеры в поперечном сечении варьируются в пределах 0,1-0,4 мм. Это происходит из-за того, что сплав имеет узкий интервал прокатки и задняя часть прутка охлаждается больше, чем передняя. Кроме увеличения временного сопротивления материала разрушению, при меньшей температуре происходит меньшее уширение поперечного сечения прутка при большей вытяжке, поэтому размеры поперечного сечения несколько изменяются.

### Анализ экспериментальных данных

Фактически, при оценке полученных данных нас интересует только те параметры, которые непосредственно влияют на получение точного профиля прутка, т.е. величины обжатий и уширений.

Формула для расчета относительных обжатий:  $\Delta h = \frac{(H_o - h_i)}{H_o}$ ,

где  $H_o$  – исходный размер (диаметр или высота) прутка, мм;  
 $h_i$  – готовый размер, мм.

Формула расчета относительных уширений:  $\Delta b_i = \frac{(b_i - B_o)}{b_i}$ ,

где  $B_o$  – исходный размер (диаметр или ширина) прутка, мм;  
 $b_i$  – готовый размер, мм.

В таблице 4 отображены данные, полученные в результате обработки экспериментальных материалов.

**Таблица 4. Относительные уширения и обжатия в зависимости от размеров поперечного сечения**

Диаметр, мм	Уширение, %	Обжатие, %	Зазор валков, мм	Овал
	5,28	2,96	4	овал 34
34	5,93	1,45	1,5	
	17,35	5,33	1,3	овал 28
28,5	14,50	9,03	1,2	
	15,85	10,71	1,2	овал 26
26	14,61	8,43	1,2	
	17,37	12,24	1,2	овал 23
23,5	17,48	10,08	1,2	
	17,65	7,11	1,2	овал 21
21,5	15,02	12,11	1,2	
	11,27	10,92	0,8	овал 19
19	15,97	3,57	0,8	
	20,50	6,13	0,8	овал 17
17,5	16,04	10,67	0,8	
	16,29	7,77	0,8	овал 16
16	16,06	8,02	0,8	
	17,90	8,47	0,8	овал 14
14,5	16,95	10,14	0,8	
	20,13	9,82	0,8	овал 13
13	17,18	11,85	1	
	14,29	9,72	0,7	овал 12
12	12,50	8,06	1	

В связи с тем, что отображение на одном графике зависимости обжатий и уширений от степени деформаций и поперечного сечения прутка для овальной полосы и круглого прутка ведет к уменьшению наглядности и усложнению анализа, решено составить два графика – отдельно для овалов и отдельно для кругов. На рис. 4 показаны графики обжатий и уширений прутков из никелевого сплава ЭИ698-ВД, полученные при деформировании круга в овал и овала в круг.



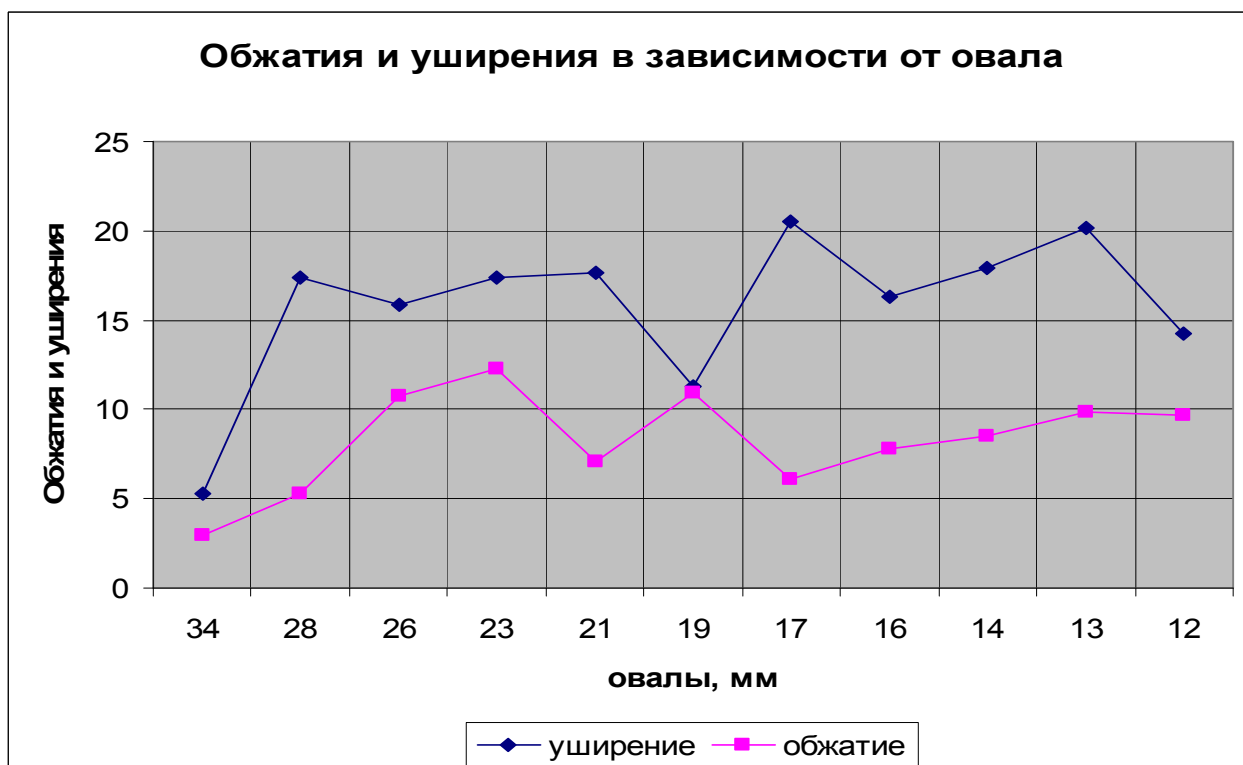
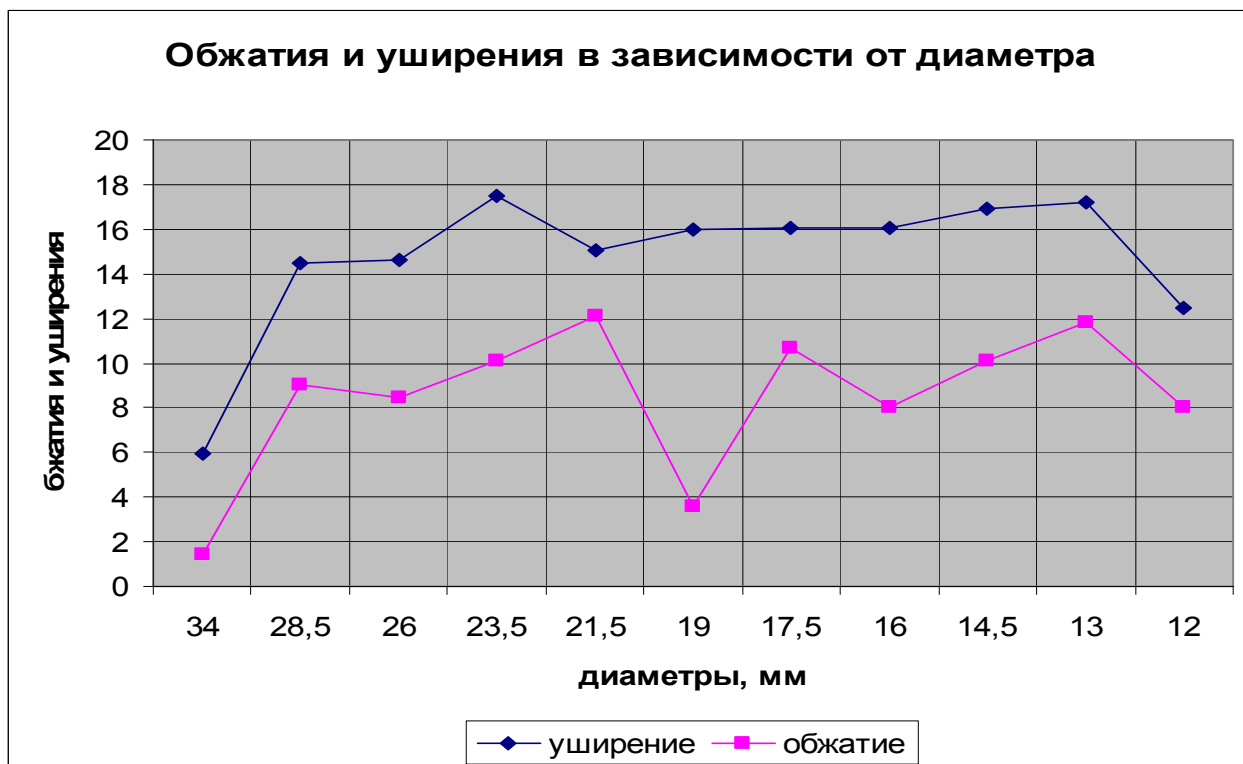


Рис. 4 Зависимость обжатий и уширений от деформации и размеров поперечного сечения.

Характер кривой обжатия меньше зависит от кривой уширения, хотя в целом и повторяет график деформации. Уширения этого сплава не превышают 20% и величины обжатия соответственно меньше. При прокатке на диаметр уширение меньше, чем для овала.

Из общей картины выпадает точка обжатия при прокатке на размер 19 мм (для диаметра). Это связано с меньшей деформацией при прокатке.

## Выводы

1. Отработанные режимы перекатки прутков Ø32 мм из никелевого сплава ЭИ698 (ХН73МБТЮ) на прутки Ø12 мм позволяют получать прутки диаметрами 12, 13, 14.5, 16, 17.5, 20, 21.5, 23.5, 26 и 28.5 мм;
2. Прутки по механическим свойствам, длительной прочности и макроструктуре после принятой на заводе термообработки соответствуют ТУ14-1-1973;
3. Выявлены причины сваливания овальной полосы при прокатке прутка с малыми деформациями (до 10%) и способы борьбы с ними;
4. Выявлены зависимости уширений от обжатий при различных размерах поперечного сечения прутка, отдельно для овалов и диаметров.
5. Разработаны технологические рекомендации по прокатке прутков Ø12, 13, 14.5, 16, 17.5, 20, 21.5, 23.5, 26, 28.5 мм из никелевого сплава ЭИ698 (ХН73МБТЮ).

## Литература

1. *А.И. Целиков* «Теория расчета усилий в прокатных станах», М.: Metallurgizdat, 1962, 494с.;
2. *Авиационные материалы: справочник. Т. 3 «Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов»* М.: ОНТИ, 1989, 567 с.;
3. *В.П. Бахтионов, М.М. Штернов* «Калибровка прокатных валков», М.: Metallurgizdat, 1957, 783 с.;

УДК 621.762

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ СПЛОШНОЙ КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ В ДВУХВАЛКОВОМ СТАНЕ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Шадрин Николай Николаевич<sup>(1)</sup>, Сизов Дмитрий Владимирович<sup>(2)</sup>

*Студент 5 курса<sup>(1)</sup>, аспирант 1 года<sup>(2)</sup>,  
кафедра «Технологии и оборудования трубного производства»  
Национальный исследовательский технологический университет  
«Московский институт стали и сплавов»*

*Научный руководитель: В.П. Романенко,  
кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии и  
оборудования трубного производства»*

В настоящее время ведется разработка новой технологии производства железнодорожных колес, совмещающей процесс винтовой прокатки-прошивки с процессом осадки для улучшения механических свойств. Применение процесса винтовой прокатки позволяет проработать литую структуру слитка, снизить анизотропию свойств заготовки, измельчить неметаллические включения.

При винтовой прокатке заготовка получает вращательное движение от валков, вращающихся в одну сторону и поступательное движение в направлении своей оси за счет угла подачи. В результате сложения этих движений каждая точка заготовки (за исключением точек на ее оси) движется по винтовой линии.

Одним из самых распространенных в настоящее время методов численного решения трехмерных нелинейных задач механики деформируемого твердого тела является метод конечных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения задач прикладной физики. С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти, для численного анализа системы позволяет рассматривать его как одну из конкретных ветвей диакоптики — общего метода исследования систем путём их расчленения.

Моделирование проводилось в специализированной системе компьютерного моделирования Deform-3D, в основу которой положен метод конечных элементов.

Для моделирования был разработан технологический инструмент двухвалкового стана винтовой прокатки, такой как: валки, направляющие линейки, толкатель, удерживающий желоб, выходное кольцо. Диаметр заготовки был выбран  $D=474\text{мм}$  аналогичный диаметру слитка

выплавляемого на ОАО «ВМЗ», а длина слитка принята равной  $L=3 \cdot D=1422\text{мм}$  (рис.1).

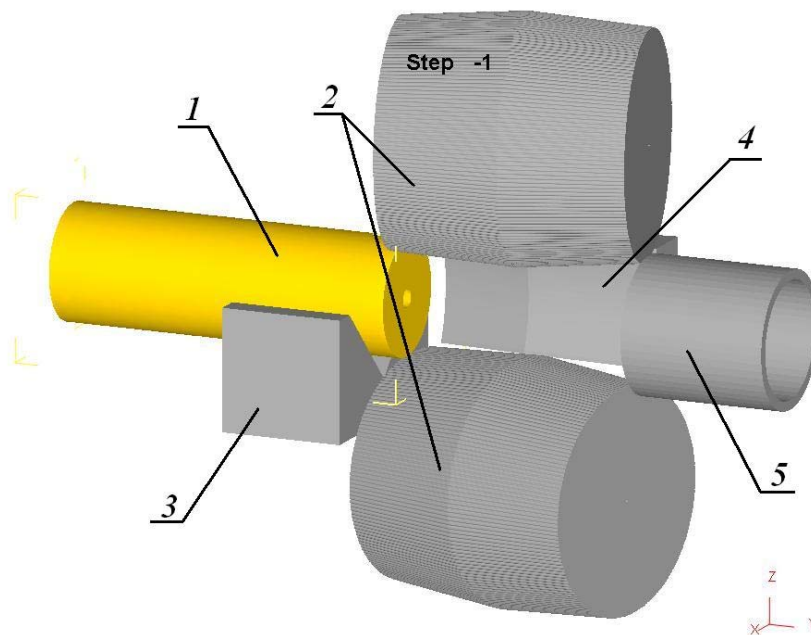


Рис.1 Очаг деформации двухвалкового стана винтовой прокатки: 1-заготовка; 2-рабочие валки; 3-удерживающий желоб; 4-направляющие линейки; 5-выходное кольцо.

Материалом для исследования приняли сталь 60, близкую по содержанию углерода к колесной стали. Приняли следующие параметры очага деформации стана винтовой прокатки: угол подачи (угол разворота валков)  $\beta=12^\circ$ , угол раскатки  $\alpha=0^\circ$ , обжатие в пережиме  $\varepsilon=20\%$ , коэффициент овализации  $\xi=1,07$ .

Задача процесса прокатки была разбита на два этапа: перед процессом деформации заготовка, нагретая до температуры  $1200^\circ\text{C}$ , остывала на воздухе в течении 40с, после чего задавалась в очаг деформации стана винтовой прокатки, где обжималась по заданным параметрам.

Были получены следующие выходные данные: форма тела, характеристики НДС (графики, поля, топограммы и гистограммы: температур, скоростей, деформаций, напряжений, разрушений и др.). На рис.2 например, представлено распределение внутреннего разрушения и накопленной степени деформации в заготовке.

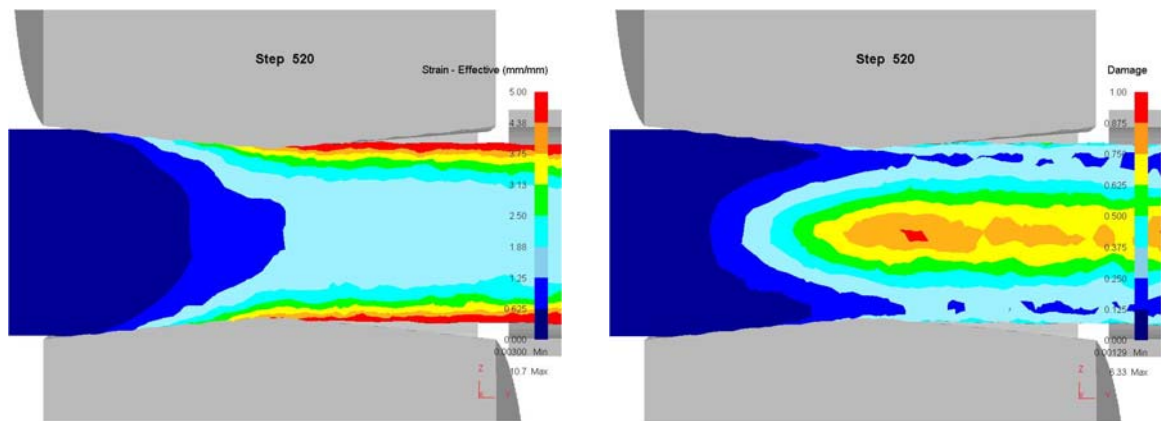


Рис.2 Распределение накопленной степени деформации (слева) и внутреннего разрушения (справа) в заготовки.

### Литература

1. «Производство железнодорожных колес» Г.А. Бибик, А.М. Иоффе, А.В. Праздников, М.И. Староселецкий, М., «Металлургия», 1982. 232с.
2. «Обработка металлов давлением» Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 960 с.
3. «Процесс прокатки» М.А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов – М.: МИСиС, 2004. – 640 с.

**Секция 10**  
**Электронные технологии в машиностроении**

УДК 537.533.2.

## ОСТРИЙНЫЕ АВТОКАТОДЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Корзинов Владимир Викторович, Тренин Александр Владимирович

*Студент 5 курса, студент 5 курса,  
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*Научный руководитель: Беликов А.И.,  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»*

### Введение

Автоэмиссионные устройства могут применяться в различных электронных приборах, использующих высокоинтенсивный электронный зонд малого диаметра.

В промышленных электронных микроскопах известно использование остриевых вольфрамовых автоэмиссионных катодов, имеющих радиус эмитирующего острия 0,01 мкм и менее. Для обеспечения устойчивой работы такого катода необходимо поддержание в прикатодной области вакуума  $10^{-10}$  мм рт.ст.

Существенным преимуществом автоэмиссионных катодов из материалов на основе углерода является их устойчивая работоспособность в вакууме  $10^{-7} - 10^{-6}$  мм рт.ст.

### Описание типов остриевых автокатодов

Известны автоэмиссионные катоды из углеродных нитей диаметром 5-8 мкм. эмитирующей поверхностью которых служит поверхность слома волокна без дополнительной обработки. Однако из-за множественности центров эмиссии катоды такой конструкции не обладают необходимой воспроизводимостью и стабильностью эмиссионных характеристик.

Повышение стабильности и воспроизводимости эмиссионных характеристик достигнуто в конструкции катодов из углеродных волокон с заостренными вершинами. Одним из типов остриевых автокатодов является автоэмиссионный катод из углеродного волокна, эмитирующее окончание которого имеет коническую форму с малым радиусом кривизны вершины 0.2-0.5 мкм и менее, закрепленного на металлическом держателе, выполненном в виде дужки из проволоки.

Автоэмиссионные катоды, имеющие такую форму эмитирующего окончания волокна, формируют расходящийся электронный поток с

телесным углом, превосходящим  $60^\circ$  и, следовательно, их электронно-оптическая яркость относительно невысока. Кроме того, при такой форме эмитирующего окончания волокна углеродные катоды характеризуются множественностью центров эмиссии и их последовательной работой, что приводит к "мерцанию" электронного пятна, и, наконец, такой катод имеет ограниченный срок службы из-за разрушения острия под действием электронной бомбардировки.

Вместе с тем для радикального улучшения основных параметров приборов, применяющихся при исследовании и обработке поверхности, таких как разрешающая способность, контрастность изображения и быстродействие, необходимы катоды, формирующие электронные потоки, локализованные в сравнительно малом телесном угле и обладающие высокой электронно-оптической яркостью, постоянным свечением электронного пятна и повышенной долговечностью.

В другом автоэмиссионном катоде, содержащем эмиттер из углеродного волокна конической формы, закрепленного на металлическом держателе, на вершине углеродного волокна вдоль его продольной оси выполнено углубление диаметром, выбранным в диапазоне 0.1-0,4 мкм, что обеспечивает повышение электронно-оптической яркости автоэмиссионного катода, однородности эмиссии и долговечности.

Эффект повышения электронно-оптической яркости автоэмиссионного катода связан с локализацией эмиссии в малом телесном угле и объясняется фокусирующим действием кромок и стенок углубления. В результате чего основная часть траекторий электронов проходит в приосевой области, формируя электронный поток высокой интенсивности, малого поперечного сечения, локализованный в малом телесном угле.

В данной конструкции в приосевую область сводится интегральный электронный поток и таким образом усредняется эмиссия множества центров и устраняется мерцание электронного пятна. Предлагаемая форма эмитирующей поверхности под действием ионной бомбардировки практически не изменяется, что обуславливает высокую долговечность работы катода.

Отличие двух конструкций описанных катодных узлов состоит в форме эмитирующей поверхности: в первом это острие с малым радиусом кривизны, а во втором - на вершине заточенного волокна по его оси имеется углубление, осуществляющее сведение электронного луча в однородный поток высокой интенсивности с малым поперечным сечением.

На рис.1 изображен автоэмиссионный катод, в котором углеродное волокно 1. являющееся собственно эмиттером, закреплено на вольфрамовой дужке-держателе 2.



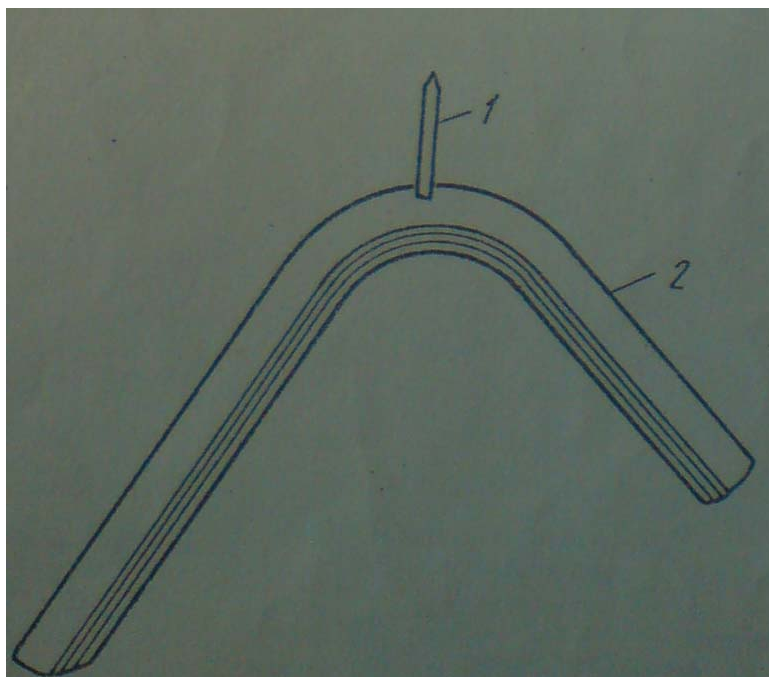


Рис. 1. Автоэмиссионный катод

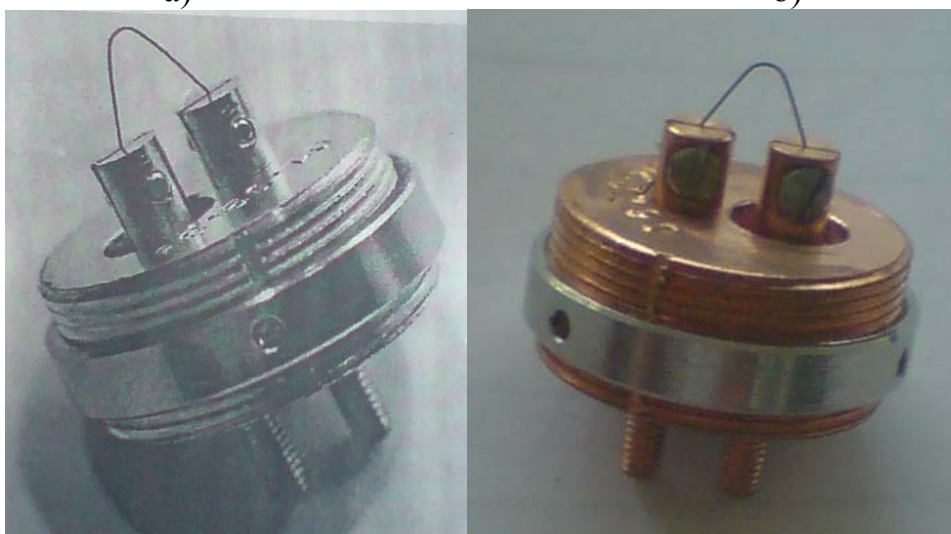
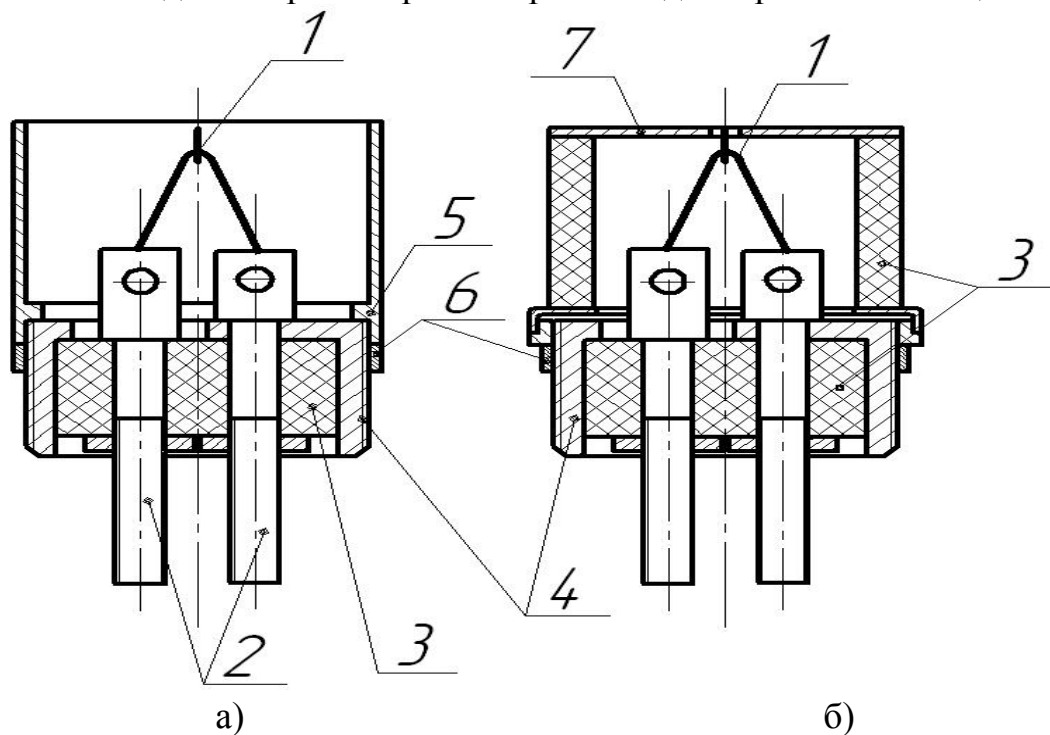
На рис. 2. приведена электронно-микроскопическая фотография окончания заостренного углеродного волокна с углублением на вершине оси (увеличение 50000 X). Конфигурация углубления (цилиндрическая, коническая либо полусферическая), а также его высота на сходимость электронного пучка и электронно-оптическую яркость не сказывается, поскольку из-за резкого спада электрического поля по высоте углубления эффективно работает лишь кольцо, высотой, не превосходящей его диаметр, прилежащее к кромке углубления.



Рис. 2. Фотография эмитирующей поверхности

С целью проведения работ по исследованию эмиссионных свойств и наблюдения картины эмиссии углеродного волокна (УВ) были разработаны два варианта конструкции катодного узла (КУ): с охранным кольцом и с

вытягивающим электродом (ВЭ), показанные на рис.3а и рис.3б. Оба варианта КУ построены на основе общей катодной ножке, изображенной на фото рис.3в, и отличаются наличием съемного охранный кольца или узла ВЭ соответственно. В данной работе рассмотрен катод с охранным кольцом.



в)

Рис. 3. Схема 2-х вариантов катодного узла с автокатодом а) - с охранным кольцом; б) - с вытягивающим электродом; в) - фото катодной ножки для вариантов (а) и (б).

1 - дужка с автокатодом; 2 - винты; 3 - керамический изолятор; 4 - колпачок; 5 - охранный кольцо; 6 - контргайка; 7 - вытягивающий электрод.

### Сборка катодного узла

Сборку катодного узла можно разделить на несколько основных этапов:

1. Установка и фиксация волокна в дужке-держателе;

2. Установка дужки (с закрепленным на ней волокном) в корпус катодного узла;

3. Заточка волокна.

Затем катодный узел подвергают испытаниям. Наиболее интересными являются этапы установки и фиксации, заточки волокна.

Установка и фиксация волокна в дужке-держателе выполняется в специальной оснастке рис. 4.

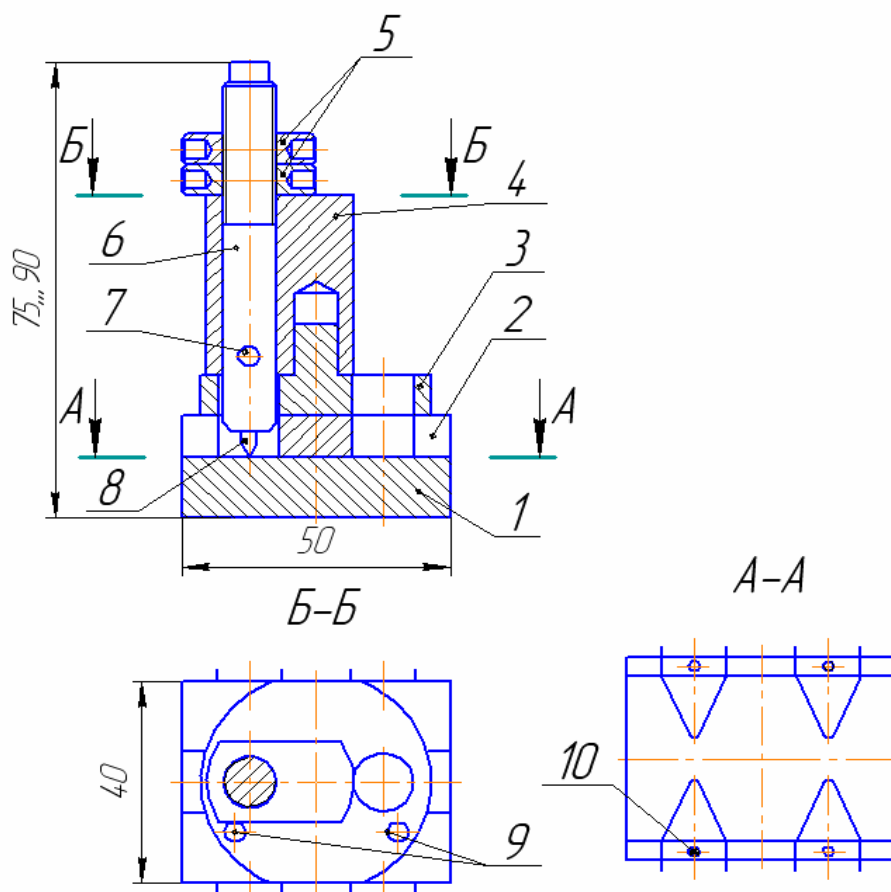


Рис. 4. Оснастка сборки и пайки УВ с дужкой

Оснастка (рис.4) применяется для сборки и пайки углеродного волокна с дужкой-держателем. Устанавливаем дужки (4 шт.) на столик 1 затем устанавливаем по направляющим штифтам 10 прижим 2, который фиксирует положение дужки. После чего устанавливаем поворотный элемент конструкции, который состоит из поворотного столика 3, корпуса 4, регулирующих гаек 5, пуансона 6 и резца 8, и при помощи ручного пресса изготавливаем паз в первой паре дужек-держателей, затем меняем позицию пуансона, фиксируя его положение штифтами 9, и изготавливаем паз во второй паре. После этого снимаем поворотный механизм и под микроскопом устанавливаем волокно (диаметр 7 мкм) в только что изготовленные пазы, затем помещаем припой (в экспериментальных целях используем аквадаг) и вместе с элементами оснастки 1 и 2 помещаем в вакуумную печь и производим пайку. Далее извлекаем оснастку из печи, разрезаем волокно лезвием.

На рис. 5 приведена фотография разработанной оснастки.

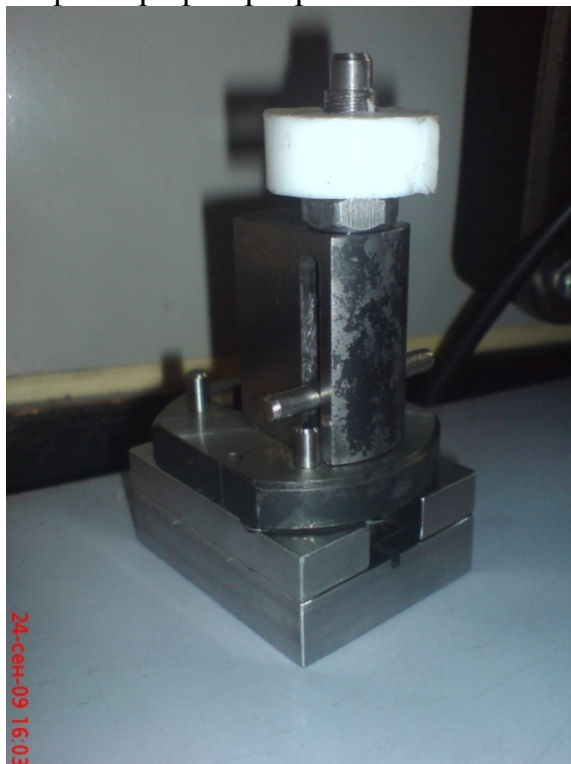


Рис. 5. Оснастка сборки и пайки УВ с дужкой-держателем



Рис. 6. Сборка дужки с острием

После изготовления прорезей в дужках, под микроскопом устанавливается и приклеивается аквадагом волокно (рис. 6). После этой операции дужка с острием устанавливается в корпус катода и происходит заточка волокна.

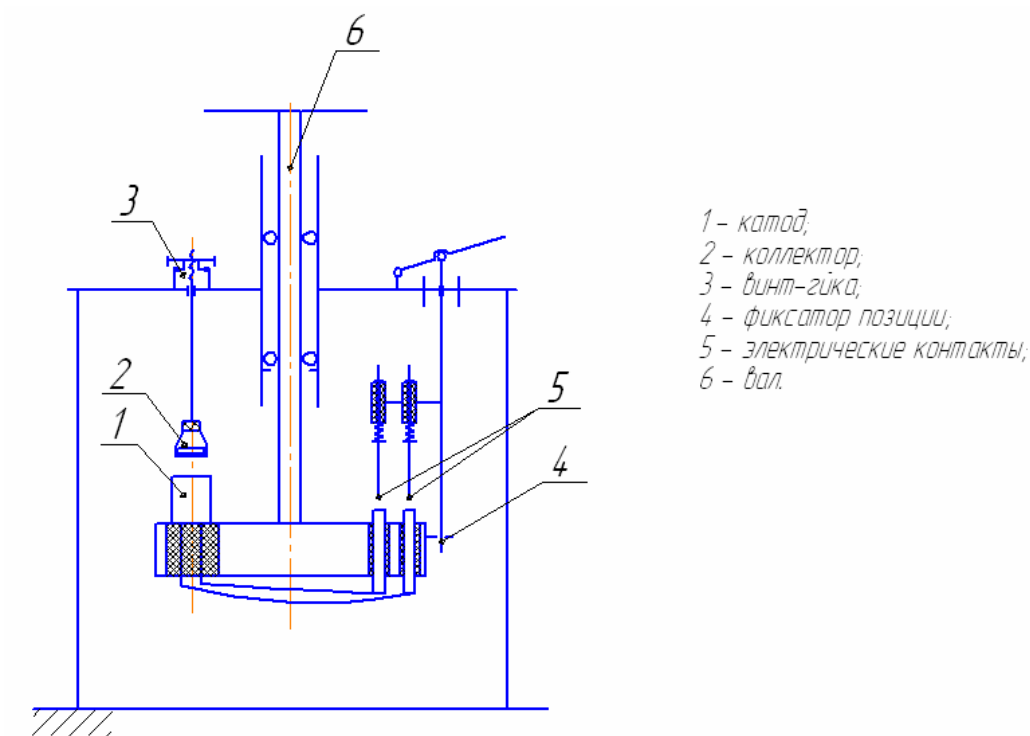


Рис. 7. Схема оснастки заточки волокна

На рис. 7 приведена схема заточки волокна. Катод 1 устанавливается в позицию на карусели, затем с помощью передачи винт-гайка скольжения 3 устанавливается расстояние между катодом и коллектором, равное 1 мм (установка расстояния происходит с помощью калибровочной пластинки высотой 1 мм). После этого на коллектор подается высокое напряжение 1,4 кВ, а электрические контакты 5 через амперметр заземляются. Затем контакты 5 и фиксатор позиции 4 поднимаются и, с помощью, вала 6 меняется позиция на карусели, и процесс заточки повторяется.

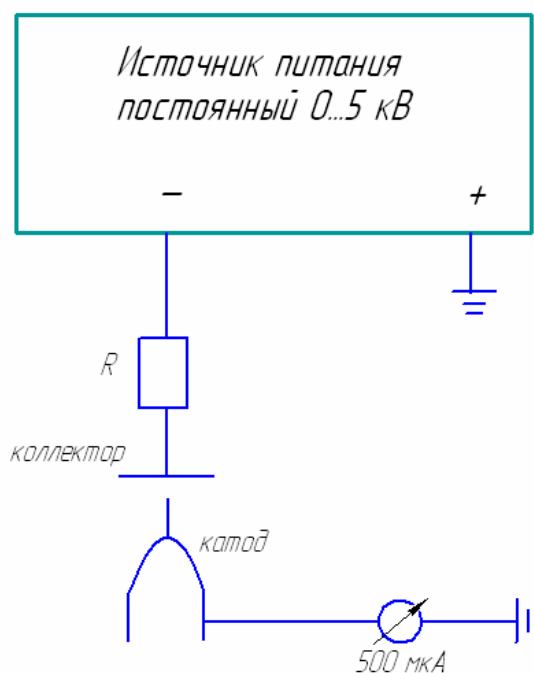


Рис. 8. Электрическая схема оснастки заточки острия



Рис. 9. Слева – приспособление заточки, справа – процесс заточки

Подготовка процесса заточки заключается в сборке электрической цепи (рис. 8), установке катодов на позиции. Процесс заточки состоит из следующих этапов:

1. Проверка заземления;
2. Включение источника питания;
3. Увеличение напряжения до 1400 В с шагом 100 В в секунду, при этом возникает дуговой разряд между острием и коллектором (по амперметру видим возникновение тока);
4. Конец заточки устанавливается падением тока разряда до нуля.

После заточки волокно имеет форму, изображенную на фотографии рис. 2. В данных острых катодах используется углеродное волокно марки ВМН-4, структура которого имеет следующую особенность: сердцевина более хрупкая, чем периферия волокна, поэтому в процессе заточки сердцевина выгорает быстрее боковой поверхности и образуется углубление.

Затем проводилось испытание катода на эмиссию.

### **Испытание автокатаода**

Испытания проводились на сверхвысоковакуумной установке СВВУ-2.

На рис. 10 представлена вакуумная схема установки, которая состоит из механического насоса 2НВР-5ДМ NI, магнитоэлектрического насоса (НОРД), криогенного насоса (ОРБИТРОН), электромагнитных VE1, VE2 и электромеханических VM1 клапанов, затвора (тип ЗПТ) VM2, натекателя VF, манометров ионизационных РА и термопарных РТ.

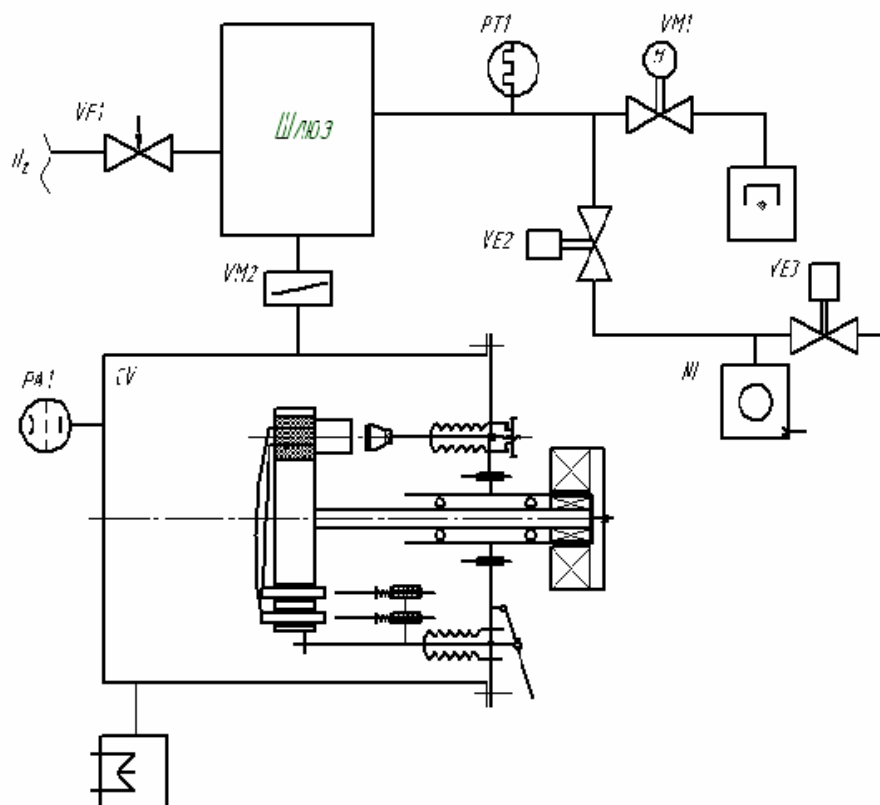


Рис. 10. Схема СБВУ-2

На рис. 11 представлена оснастка испытания катодов. Катоды (8 шт.) устанавливаются на позиции карусели. Затем камера откачивается до необходимого вакуума. Регулятор 4 служит для изменения расстояния между катодом 1 и коллектором 2. Магнитный ввод вращения служит для смены позиции.

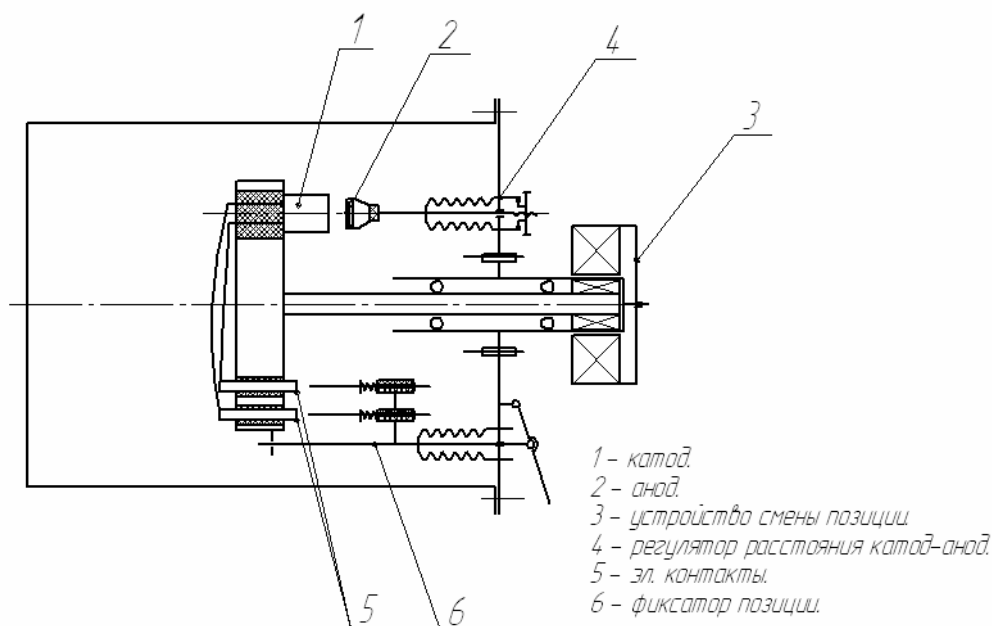


Рис. 11. Приспособление испытания катода

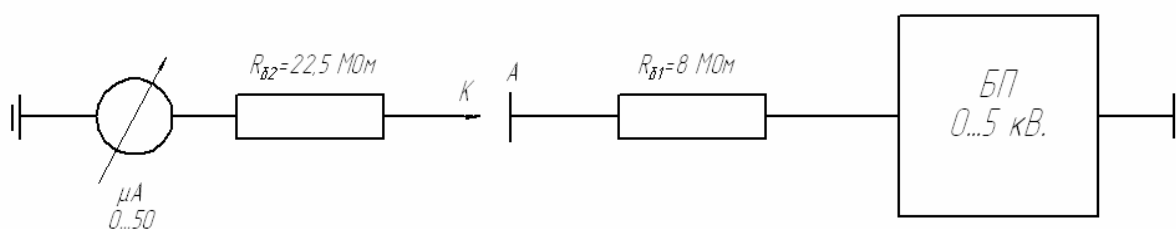


Рис. 12. Электрическая схема испытания

Электрическая схема (рис.12) состоит из двух балластных сопротивлений  $R_{61}$  и  $R_{62}$ , блока питания БП (0...5кВ), микроамперметра (0...50), катода К, анода А.

На карусель было установлено три катодных узла. Эксперимент проводился при давлении в камере  $2,8 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.

На катод подали напряжение, ток эмиссии был зафиксирован при напряжении 1,6 кВ. Ток эмиссии в первые минуты был нестабилен, это можно объяснить процессом обезгаживания волокна, т.к. при появлении электронов остаточные газы начали ионизироваться и «бомбардировать» остриё, из-за чего его температура возросла. Затем, когда ток эмиссии установился постоянным, увеличили потенциал до 1,8 кВ, 2,0 и 2,2. После чего катод и анод закоротило между собой. На рис.13 приведена вольтамперная характеристика, снятая при эксперименте.

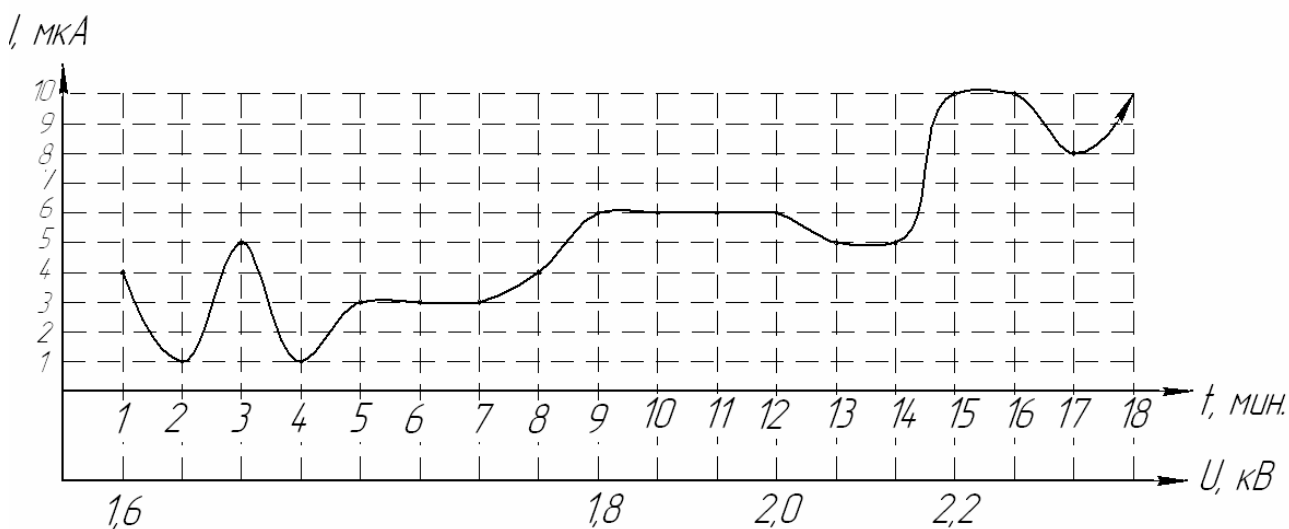


Рис. 13. Результаты эксперимента

В результате эксперимента была получена вольтамперная характеристика (рис. 13), на которой видно, что ток эмиссии достаточно стабилен. В дальнейшем планируется сопоставить параметры наноуглубления (полученного в результате заточки) на торце волокна.



УДК 621.384

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ СВОЙСТВ КРЕМНИЯ В МИКРОДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ**

Котова Александра Михайловна

*Студентка 4 курса,  
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.Б. Цветков  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»*

### **Введение**

В современных микротехнологиях кремний все более прочно занимает место в качестве не только полупроводникового, но и конструкционного материала.

Высокая чистота и совершенство монокристаллической структуры применяемого кремния позволяют оптимизировать механические свойства приборов, изготавливаемых из него, подобно тому, как были оптимизированы их электронные свойства. Результатом этого является улучшение характеристик, повышение надежности и воспроизводимости параметров изделий.

Тот факт, что кремний, помимо своей обычной роли электронного материала с хорошо развитой технологией изготовления микроэлектронных устройств, может также использоваться как прецизионный, высоконадежный и прочный конструкционный материал, лежит в основе микро - электромеханических систем (МЭМС).

МЭМС включают широкий круг функциональных микроустройств, среди которых ключевую роль играют микродатчики для измерения значений физических параметров и преобразования их в электрические сигналы.

Принцип действия многих видов микродатчиков (давления, силы, ускорения и т.д.) основан на использовании пьезорезистивных свойств монокристаллического кремния.

Цель работы – на основе анализа физических свойств кремния разработать математическое обеспечение для расчета основных технических параметров кремниевых чувствительных элементов на примере микродатчика давления.

## Принцип действия и структура пьезорезистивного микродатчика

Чувствительный элемент пьезорезистивного микродатчика включает (рис. 1) четыре диффузионных пьезорезистора, внедренных в упругую кремниевую диафрагму и соединенных между собой в мостовую схему – мост Уитстона. При приложении давления и изгибе диафрагмы изгибающие напряжения ведут к возникновению пьезоэффекта. Сопротивление резисторов меняется, в результате они могут служить в качестве тензодатчиков.

Давление на чувствительный элемент приводит к появлению напряжений, которые изменяют сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_3$  – на  $\Delta R_{//}$ , а резисторов  $R_2$  и  $R_4$  на величину  $\Delta R_{\perp}$ . Индексы  $\perp$  и  $//$  обозначают резисторы, направленные перпендикулярно или параллельно краям диафрагмы соответственно.

При постоянном напряжении питания  $U_{\Pi}$  выходное напряжение  $U_B$  за счет разбалансировки моста становится отличным от нуля:

$$U_A = U_I \frac{\Delta R_{//} - \Delta R_{\perp}}{2R + \sum \Delta R}; \quad (1)$$

где  $\sum \Delta R = \Delta R_{\perp} + \Delta R_{//}$ .

В первом приближении можно считать, что  $\Delta R_{\perp}$  и  $\Delta R_{//}$  существенно меньше  $R$ , поэтому знаменатель полученного выражения упрощается:

$$U_B = U_{\Pi} \frac{\Delta R_{//} - \Delta R_{\perp}}{2R} = \frac{U_{\Pi}}{2} \left[ \frac{\Delta R_{//}}{R} - \frac{\Delta R_{\perp}}{R} \right] \quad (2)$$

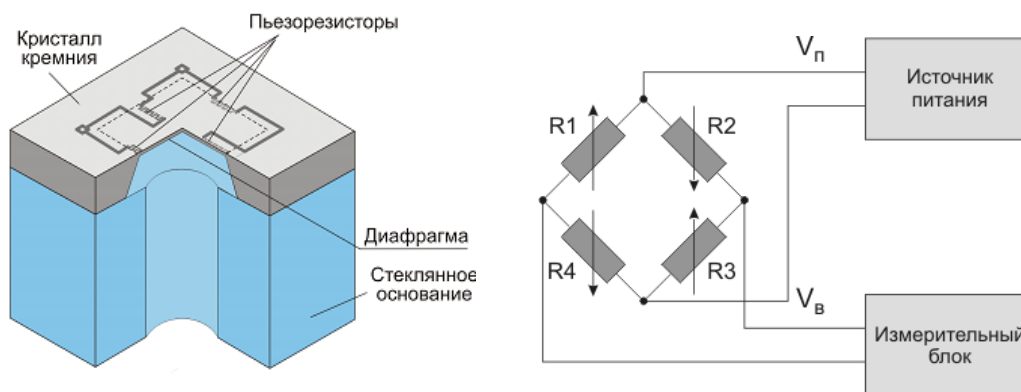


Рис. 1. Кремниевый чувствительный элемент.  
а – конструкция, б – мостовая схема соединения резисторов

## Пьезорезистивность

Пьезорезистивность – это явление изменения электрического сопротивления тела, в результате действия внешней силы.

При приложении внешней силы, соотношение между величиной деформации и приложенной нагрузкой определяется законом Гука. При трехосном напряженном состоянии тела напряжение и деформацию в

трехмерном пространстве записывают в виде тензоров второго ранга. Следовательно, соотношение между ними описывается тензором четвертого ранга – тензором жесткости.

Тензором называется матрица, которая преобразовывает один вектор в другой, при условии, что преобразование существует в любой координатной системе.

Запишем закон Гука при трехосном напряженном состоянии тела

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $\varepsilon_{kl}$  – тензор деформаций,  $C_{ijkl}$  – тензор жесткости.

При трехосном напряженном состоянии тензор напряжений состоит из 6 независимых компонентов. Для изотропного материала тензор жесткости может быть записан с помощью 2-х переменных (упругих констант) – модуля Юнга  $Y$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ , а для анизотропного – с помощью 3-х.

### Эффект пьезорезистивности

В изотропном материале, значение электрического сопротивление резистора определяется следующим выражением

$$R = R(\rho, A, L) = \frac{\rho L}{A} \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала,  $A$  – площадь поперечного сечения резистора,  $L$  – длина резистора.

Если резистор подвергается действию силы, то его размеры меняются. Для малых изменений размеров или сопротивления мы можем записать

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{R} \left( \frac{\partial R}{\partial L} dL + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \right) = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

Выражение (5) показывает изменение сопротивления в зависимости от изменения длины, площади поперечного сечения и удельного сопротивления. Изменение сопротивления за счет изменения геометрических размеров для полупроводников незначительно, по сравнению с вкладом за счет изменения удельного сопротивления, поэтому геометрической составляющей пренебрегаем.

Рассмотрим, как приложение нагрузки влияет на атомную структуру и свойства материала. Когда резистор деформируется, расстояние между двумя атомами увеличивается – это приводит к изменению ширины запрещенной зоны и к изменению эффективной массы носителей. Таким образом, подвижность носителей заряда и удельное сопротивление изменятся.

Чтобы описать относительное изменение удельного сопротивления используем линейную модель в предположении, что  $\Delta\rho/\rho$  меняется пропорционально деформации.

Константу пропорциональности обычно записывают равной  $\pi_L Y$ , где  $\pi_L$  – это пьезорезистивный коэффициент, который измеряется в  $\text{Па}^{-1}$ . В

общем случае  $\pi$  является тензором четвертого ранга, учитывающим компоненты электрического поля, плотности электрического тока и механических напряжений. Каждая из этих компонент в свою очередь связана с направлением кристаллографических осей.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_L \sigma = \pi_L Y \varepsilon_L \quad (6)$$

### Эффект пьезорезистивности в кремнии

Кремний является анизотропным материалом, поэтому описать изменение сопротивления для кремния несколько сложнее. Рассмотрим случай, где направление тока через резистор перпендикулярно или параллельно приложенной нагрузке (рис. 2).

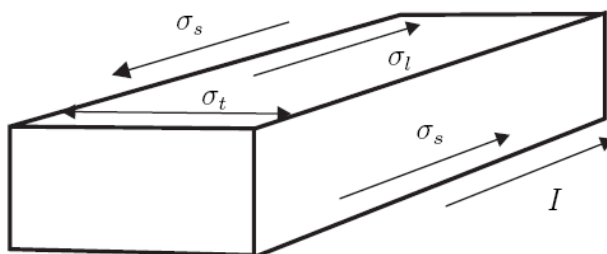


Рис. 2. Поверхностные напряжения в пьезорезисторе

Ток,  $I$  сонаправлен с напряжением  $\sigma_l$ . В этом случае, изменение удельного сопротивления будет описываться тремя пьезорезистивными коэффициентами и соответствующими напряжениями:

$\pi_l$  – коэффициент, описывающий влияние продольной нагрузки (коэффициент пьезорезистивности в перпендикулярном направлении),  $\sigma_l$  – напряжение, приложенное в том же направлении, вдоль которого течет ток.

$\pi_t$  – коэффициент, описывающий влияние поперечной нагрузки (коэффициент пьезорезистивности в продольном направлении),  $\sigma_t$  – напряжение, перпендикулярное направлению течения тока

$\pi_s$  – коэффициент, описывающий влияние касательной нагрузки,  $\sigma_s$ .

Типовые значения продольных, поперечных и касательных пьезорезистивных коэффициентов для резистора, ориентированного вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  на кремниевой подложке с ориентацией кристаллической плоскости (001) приведены в табл. 1.

**Таблица 1 Значения пьезокоэффициентов**

$\pi$	p - тип
$\pi_l(10^{-11} \text{ Па}^{-1})$	+40.5
$\pi_t(10^{-11} \text{ Па}^{-1})$	-38.5
$\pi_s(10^{-11} \text{ Па}^{-1})$	0

Учитывая приведенные выше определения, изменения удельного сопротивления выглядит следующим образом

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta R}{R_0} = \pi_l\sigma_l + \pi_t\sigma_t + \pi_s\sigma_s \quad (7)$$

В случае, когда резисторы на диафрагме ориентированы вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  как на рис. 2,  $\pi_s = 0$ . Тогда

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \pi_l\sigma_l + \pi_t\sigma_t + \pi_s\sigma_s = \pi_l\sigma_l + \pi_t\sigma_t \quad (8)$$

### Пример расчета

Рассчитаем относительные изменения сопротивлений пьезорезисторов p-типа, расположенных параллельно и перпендикулярно к краям диафрагмы для случая, когда длина диафрагмы  $L = 1$  мм и толщина диафрагмы  $H = 10$  мкм.

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{//} &= \pi_l\sigma_l + \pi_t\sigma_r = \\ &= 40,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,115 \cdot \left[ \frac{1000}{10} \right]^2 P - 38,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,294 \cdot \left[ \frac{1000}{10} \right]^2 P = \\ &= -6,6 \cdot 10^{-7} \cdot P \text{ (МПа}^{-1}\text{)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\perp} &= \pi_l\sigma_r + \pi_t\sigma_t = \\ &= 40,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,294 \cdot \left[ \frac{1000}{10} \right]^2 P - 38,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,115 \cdot \left[ \frac{1000}{10} \right]^2 P = \\ &= 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot P \text{ (МПа}^{-1}\text{)} \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что для выбранной схемы размещения резисторов изменения сопротивлений продольных и поперечных резисторов будут близкими по абсолютным значениям, но иметь противоположные знаки, увеличивая разбалансировку мостовой схемы.

### Заключение

При возникновении напряжений пьезоэффект в кремнии существенно превышает тензоэффект, т. е. приращение сопротивления за счет изменения удельного сопротивления значительно больше приращения сопротивления за счет изменения за счет геометрии.

Это позволяет при малых габаритах кремниевой упругой мембраны получить очень высокую чувствительность измерительного элемента. На этом принципе основаны, в частности, кремниевые микродатчики давления.

Отметим, что максимальный выходной сигнал получается в том случае, когда изменения сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ,  $R_4$  противоположны по знаку. Чтобы это обеспечить, в конструкции мостовой схемы микродатчика резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ,  $R_4$  направлены параллельно и перпендикулярно краям диафрагмы соответственно.

Значения продольных и поперечных пьезорезистивных коэффициентов близки по абсолютным значениям, но имеют противоположные знаки. При этом изменения сопротивления продольных и поперечных резисторов будут иметь такие же знаки, увеличивая разбалансировку мостовой схемы.

УДК 621.384

## МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНДОВОЙ НАНОБРАБОТКИ

Куликов Игорь Николаевич, Тетерук Дмитрий Владимирович

*Студенты 4 курса,*

*Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Цветков Ю.Б.*

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

### Введение

В основе работы атомно-силовой микроскопа (АСМ) лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики регистрирующие положение кантилевера (упругой консоли с острым зондом на конце). Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Анализируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Дальнейшее развитие АСМ привело к возможности использования его не только в качестве микроскопа, но и как приспособления для нанесения топологического рисунка на поверхность образца.

### Кантилевер

Основные свойства АСМ напрямую зависят от кантилевера – важнейшей составляющей микроскопа.

Кантилевер – это конструкция, состоящая из основания, балки (консоли) и зонда (рис. 8). У разных кантилеверов коэффициент жесткости балки  $k$  варьируется от  $10^{-3}$  до  $10$  Н/м.

Диапазон изменения радиуса закругления  $R$  наконечника зонда (рис. 9) с развитием АСМ изменялся от  $100$  до  $5$  нм. Очевидно, что с уменьшением  $R$  микроскоп позволяет получать изображения с более высоким разрешением. Угол при вершине иглы  $\alpha$  – также немаловажная характеристика зонда, от которой зависит качество изображения. Значение  $\alpha$  в различных кантилеверах меняется от  $20^\circ$  до  $70^\circ$ ; не трудно заметить, что чем меньше  $\alpha$ , тем выше качество получаемого изображения.

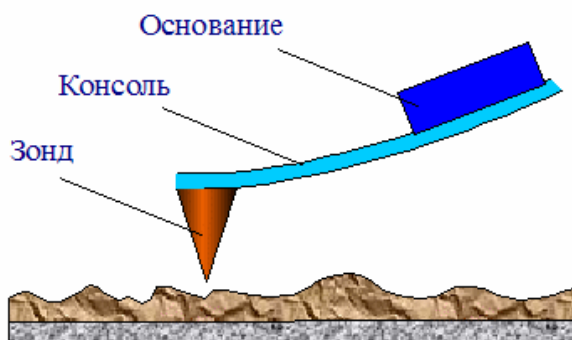


Рис. 8. Конструкция кантилевера

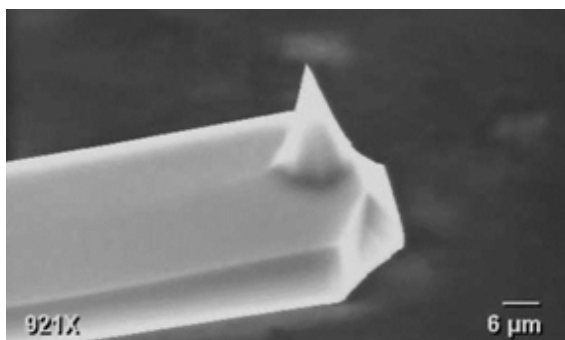


Рис. 9. Зонд АСМ

### Механическое воздействие

С момента своего изобретения АСМ не был приспособлен для воздействия на поверхность. Однако при сканировании органических подложек контактным методом на образцах оставались повреждения, вызванные движением зонда по их поверхности. Данный факт и навел инженеров на мысль об использовании АСМ не только в качестве микроскопа, но и как устройства для модификации рельефа поверхности подложки.

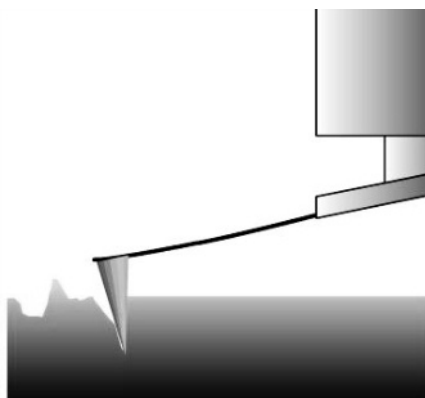


Рис. 3. Механическое воздействие

Механическое воздействие – наиболее простой в реализации метод, при котором зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с



достаточно большой силой прижима (до 100 мкН), так что на подложке или лежащем на ней слое резиста (как неорганическом, так и органическом) формируется рисунок в виде углублений (царапин) (рис. 3).

Разделяют два основных типа контактного метода: статический (рис. 4) и динамический (рис. 5).

При статическом режиме происходит непрерывный контакт зонда с поверхностью. Различают следующие статические методы сканирования поверхности:

- Метод постоянной высоты – кантилевер поддерживается на постоянной высоте. Отклонения зонда отражают рельеф поверхности исследуемого образца.

- Метод постоянной силы – величина изгиба кантилевера поддерживается в процессе сканирования постоянной при помощи системы обратной связи. Вертикальные смещения сканера отражают рельеф поверхности исследуемого образца.

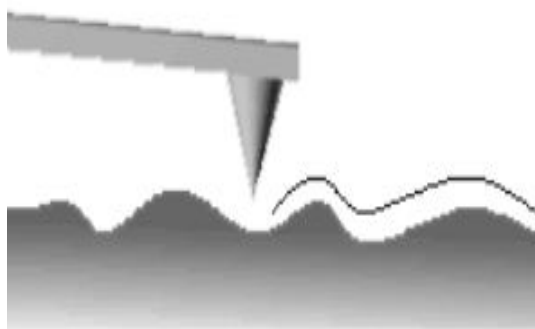


Рис. 4. Статический режим

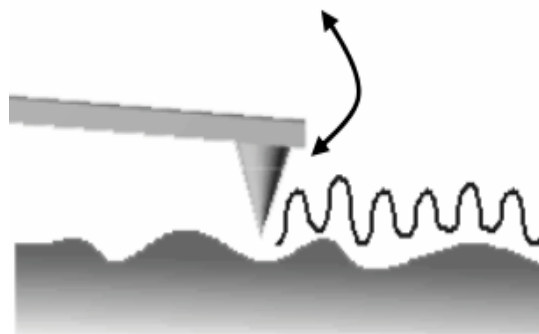


Рис. 5. Динамический режим

- Контактный метод рассогласования – сигнал рассогласования системы обратной связи, возникающий в процессе сканирования с использованием метода постоянной силы содержит дополнительную информацию относительно рельефа поверхности (перемещение кантилевера). Он может быть использован для более полного воспроизведения рельефа.

- Метод латеральных сил – при сканировании гладкой поверхности с участками, имеющими различные коэффициенты трения, угол скручивания меняется на каждом участке. Данный метод позволяет различать области с переменными коэффициентами трения.

- Отображение сопротивления растекания – между зондом и подложкой создается напряжение, и проводятся измерения результирующего тока через образец в зависимости от положения зонда одновременно с получением данных о рельефе по методу постоянной силы.

Один из примеров статического воздействия зонда на поверхность с целью формирования топологического рисунка является наногравировка (рис. 6). Эта технология нанолитографии достаточно проста, однако у нее

есть определенные недостатки. При формировании наноканавки случайные торсионные изгибы кантилевера приводят к краевым неоднородностям рисунка. Кроме того, предварительное и последующее после нанолитографической операции сканирования приводят к сдвиговым искажениям линии.

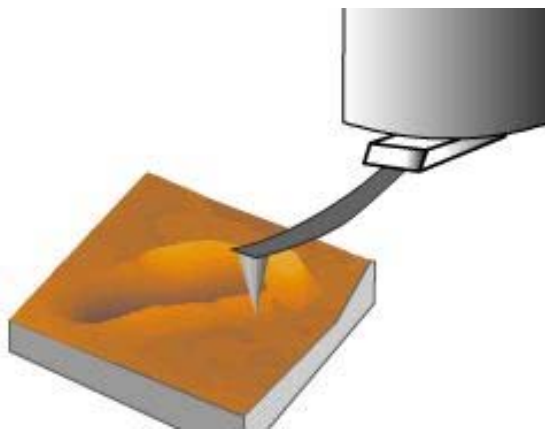


Рис. 6. Наногравировка

Особенность динамических контактных методик заключается в том, что одновременно с зондом в колебательном состоянии находится и прилегающая к нему область поверхности образца. При этом поверхность образца может колебаться не только в нормальном, но и в латеральном (боковом) направлении, а кантилевер может колебаться не только на основной резонансной частоте, но и на высших гармониках.

Данные методики позволили существенно уменьшить нежелательное механическое воздействие зонда на поверхность в процессе сканирования, а также значительно увеличить срок службы кантилеверов. Кроме того, развитие колебательных методик существенно расширило арсенал возможностей АСМ по измерению различных свойств поверхности образцов: контактная жесткость, модуль Юнга и другие физические параметры поверхности образца.



Рис. 7. Пример изображения, сформированного методом наночеканки

Примером динамического режима воздействия на поверхность может служить наночеканка (рис. 7). Модификация поверхности происходит за счет формирования углублений на поверхности образца колеблющимся зондом, при этом используется прерывисто-контактный метод сканирования. Такой метод нанолитографии исключает сдвиговые искажающие воздействия, решает проблему торсионных искажений и позволяет производить визуализацию сформированного рисунка без серьезного воздействия на поверхность подложки или резиста.

Главным недостатком метода механического воздействия является высокая степень износа вершины зонда, что приводит к неконтролируемому воздействию на подложку, уменьшению разрешения и ухудшению сканирующих свойств кантилевера. Существуют методики создания защитных покрытий на поверхности вершины (в том числе и алмазных), но они слишком дороги и непригодны для массового производства.

### **Dip-Pen («Перьевая ручка»)**

В данном методе на наконечник АСМ наносится тонкий слой молекул – «чернил», которые могут быть перенесены на поверхность подложки во время контакта с зондом (рис. 8). Таким образом, можно сформировать рисунок из различных молекул – неорганических, органических, биомолекулярных, полимерных соединений на поверхности различных материалов.

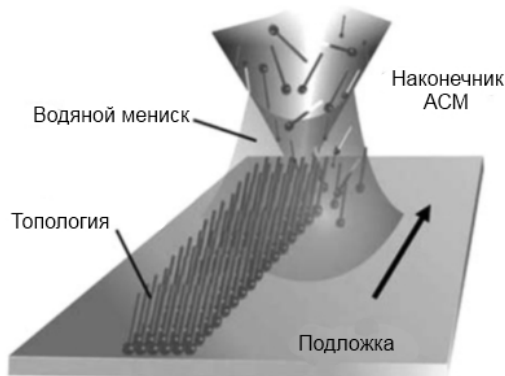


Рис. 8. Технология Dip-Pen

Предел разрешения Dip-Pen зависит от физического размера наконечника. В самом простом случае наконечник может состоять из наносимого материала (например, золото), который переносится на подложку путем приложения напряжения или непосредственного соприкосновения за счет капиллярных эффектов.

Существует 2 режима нанесения.

Во-первых, посредством капиллярных эффектов и взаимодействия воды и наконечника АСМ стало возможно использование водяного мениска, который формируется между наконечником и воздухом и которым можно контролировать перемещение молекул с наконечника на подложку.

Во-вторых, можно использовать «чернила», которые взаимодействуют с подложкой на молекулярном уровне. Стеkanie молекул с наконечника происходит за счет сил молекулярного притяжения между молекулами. Благодаря хемосорбции и самоорганизации молекул (рис. 9) на подложке формируются высокостабильные наноструктуры.



Рис. 9. Самосборка молекул

С помощью самоорганизации молекул можно создавать микрочипы с внедренными наноструктурами, которые могут включать в себя различные компоненты, вплоть до биомолекулярных соединений типа пептиды и ДНК.

Принцип самоорганизации молекул заключается в следующем. Самоорганизованный монослой – это слой, организованный из амфифильных молекул, то есть молекул, одновременно состоящих из гидрофильных (хорошо смачиваемых водой) и гидрофобных (плохо смачиваемых водой) радикалов (рис. 10). При этом на подложке остается основная группа, состоящая из гидрофильных радикалов, а в «хвостовой» части – функциональная группа.

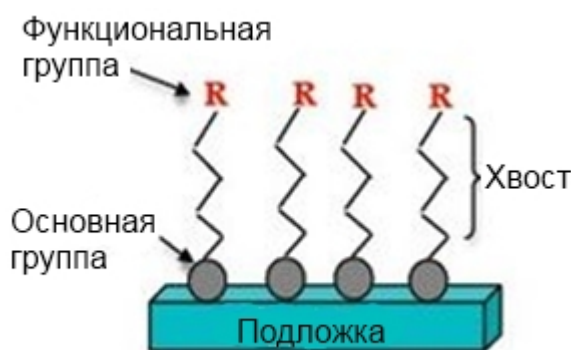


Рис. 10. Самоорганизованный монослой

связи стабильны при различных температурах, растворителях и т.д.

Одним из преимуществ технологии Dip-Pen является то, что нанесение может происходить при атмосферном давлении.

С помощью данной технологии можно получать разрешение вплоть до 5 и даже 1 нм – в зависимости от скорости диффузии и молекулярного состава «чернил», скорости движения зонда и т.п. Однако технология имеет следующие пределы: нанесение начинается касанием и заканчивается поднятием наконечника, что очень сильно тормозит весь процесс. Высота получаемого рельефа достигает всего нескольких молекулярных слоев за одно нанесение. Если необходимо нанести рисунок на большую площадь, то зонд нужно постоянно смачивать в «чернилах», что существенно увеличивает время нанесения рисунка.

При применении различных кантилеверов возможно получить разрешение дорожек до 10 нм, а расстояния между ними – до 5 нм. Очевиден тот факт, что разрешение зависит от остроты наконечника, скорости движения, физических свойств осаждаемых молекул.

Высокое разрешение позволяет не только производить выравнивание шаблонов с нанометровой точностью, но и наносить рисунки разными «чернилами» на уже существующую топологию, например, полученную после фотолитографии, в результате чего образуются многослойные трехмерные изображения (рис. 11).

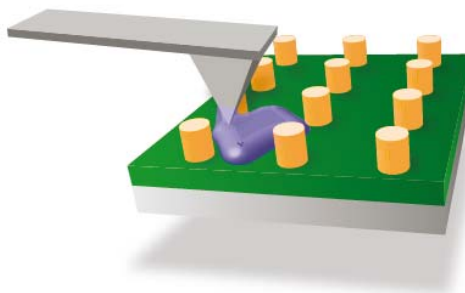


Рис. 11. Многослойное изображение

Еще одно усовершенствование технологии Dip-Pen – создание массива кантилеверов (рис. 12) – позволило конкурировать ей с такими популярными методами, как электронная фотолитография и наностамповка. Сначала для формирования топологии использовался только один зонд, теперь же появилась возможность использовать целые серии из кантилеверов, общее число которых достигает на сегодняшний день до 55000 на квадратном сантиметре.

Существует возможность прикладывать силу как ко всему массиву кантилеверов, так и непосредственно к каждому, реализуя идею наноплоттера – создание многослойных, различных по своему составу и размерам структур.

Высокое разрешение, достаточно низкие требования к внешней окружающей среде, адаптивность к материалу, низкая стоимость по сравнению с другими методами – все это является преимуществами при

формировании прототипов, которые невозможно воспроизвести другими методами.

Таким образом, Dip-Pen – одна из самых перспективных технологий формирования топологического рисунка.

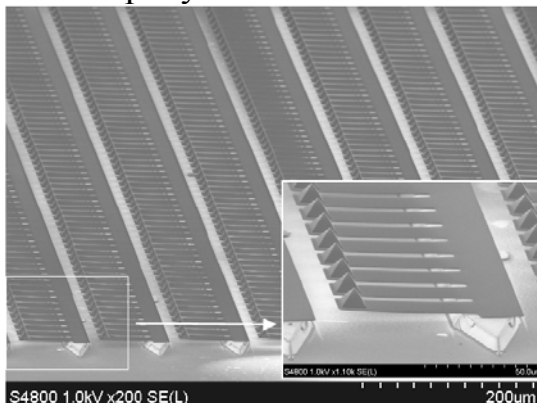


Рис. 12. Массив кантилеверов

### Локальное анодное окисление

Кремний активно реагирует с кислородом, быстро образуя тонкую пленку оксида кремния. Чтобы продолжить оксидирование молекулам кислорода необходимо диффундировать сквозь замедляющий данный процесс слой оксида и вступить в реакцию с атомами кремния.

При локальном оксидировании (рис. 13) рисунок из диоксида кремния формируется на кремниевой подложке с помощью наконечника АСМ. Напряжение между зондом и подложкой (около  $10^9$  В/м) вызывает диффузию ионов гидроксидной группы и их передвижение из водяного мениска на поверхность кремния, где образуется оксид.

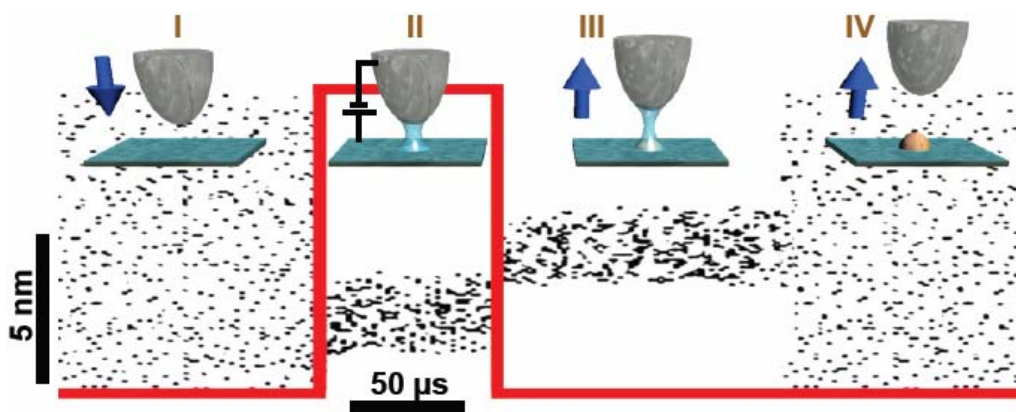


Рис. 13. Локальное анодное окисление

В условиях окружающего воздуха или другой влажной среды поверхности образца и зонда покрыты слоем адсорбированной воды. Когда зонд приближается к поверхности достаточно близко, эти слои приходят в контакт, и под действием капиллярных сил образуется водяной мениск. При приложении разности потенциалов на границе вода-поверхность, в воде и на

зонде инициируется электрохимическая реакция. Если поверхность заряжена положительно, то зонд и поверхность вступают в электрохимическое взаимодействие как катод и анод соответственно. Окисел начинает расти в точке подложки строго под зондом (рис. 14).

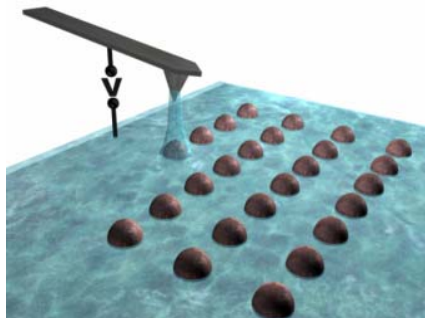


Рис. 14. Формирование топологии

Разрешение получаемого рисунка зависит от скорости движения кантилевера, разности потенциалов и расстояния от зонда до поверхности и т.п. (рис. 15).

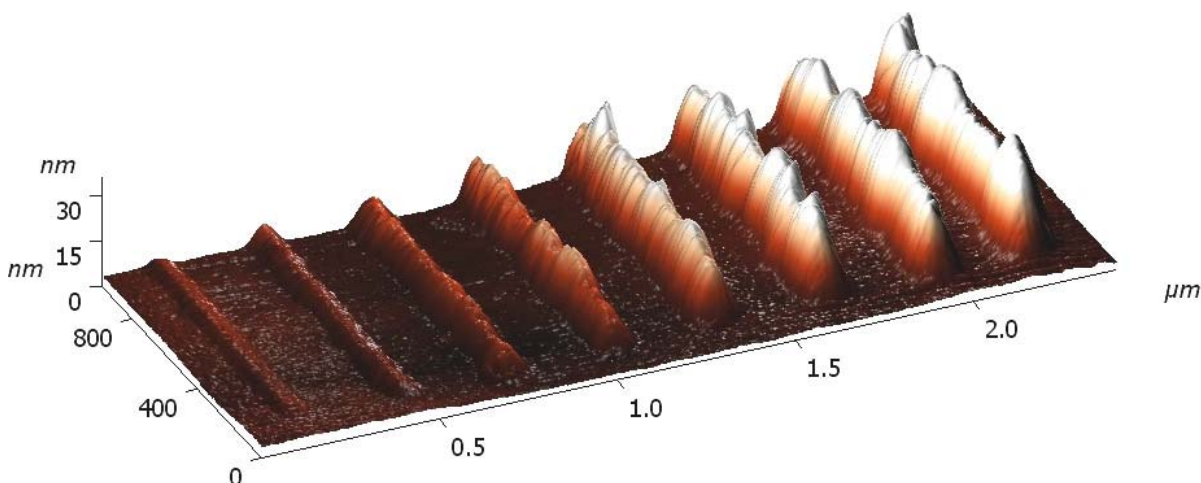


Рис. 15. Зависимость разрешения от скорости движения кантилевера, расстояния от зонда до поверхности и прикладываемого напряжения

### Электрическая нанолитография

Метод электрической нанолитографии (ЭНЛ) (рис. 16) является общим случаем «чернильной» нанолитографии, который включает в себя как плюсы технологий Dip-Pen и локального анодного окисления, так и их минусы.

В данном методе молекулы переносятся с наконечника АСМ также как и в Dip-Pen с той разницей, что между зондом и подложкой подается напряжение, и непосредственно под наконечником происходит электрохимическая реакция. Чтобы прекратить нанесение линии необходимо уменьшить напряжение до 0; при этом водяной мениск сохраняется.

ЭНЛ обеспечивает точную доставку «чернил» за один этап. Поверхность под наконечником сначала подготавливается с помощью электроокисления для адсорбции молекул, «перетекающих» с зонда.

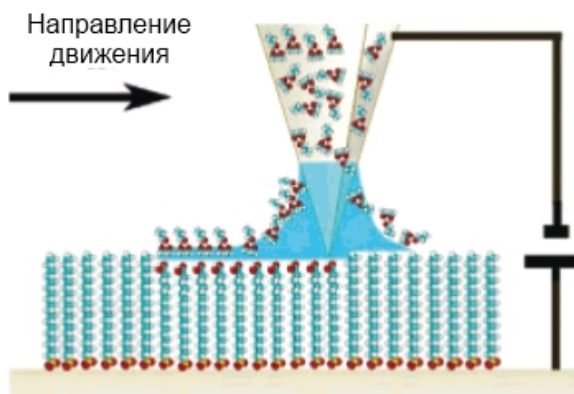


Рис. 16. Электрическая нанолитография

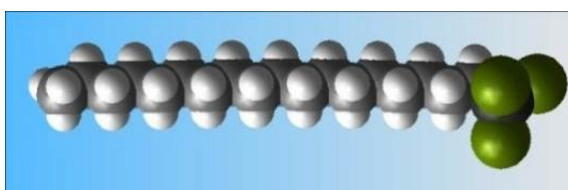


Рис. 17. Молекула

Далее происходит перемещение молекул, химическая реакция и организация молекул на поверхности. Например, при подаче напряжения между кремниевой подложкой с самоорганизованным монослоем из октадецилтрихлорсилана (ОТС –  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$ , рис. 17) и наконечником АСМ происходит электрохимическое превращение основной метильной группы в гидрофильную карбоксильную  $[-\text{COOH}]$ , (ОТСох).-В то время как при DPN на подложку сначала наносят слои ОТСох в специальном растворителе, содержащем данные молекулы, которые потом самоорганизуются на окисированных областях. В ЭНЛ благодаря электрохимической реакции этот процесс происходит в один этап – это дает преимущество над Dip-Pen и выигрыш во времени.

### Нагреваемый зонд

Наиболее перспективным методом нанесения топологии на поверхность является использование нагреваемого зонда (рис. 18). Главная идея метода заключается в том, что зонд определенной формы разогревается и создает рельеф путем механического воздействия на поверхности подложки. Разогрев может производиться как лазерным излучением, так и классическим резистивным методом. Последние исследования показали, что нагреваемая область зонда может быть ограничена 2 нм, а температура может достигать  $500^\circ\text{C}$ .

Также термический метод широко применяется в технологии Dip Pen. Это связано с тем, что при нагретом кантилере «чернила» становятся более текучими и легко переносятся на поверхность образца. Благодаря этому удается получить более высокое разрешение по сравнению с холодными кантилерами.



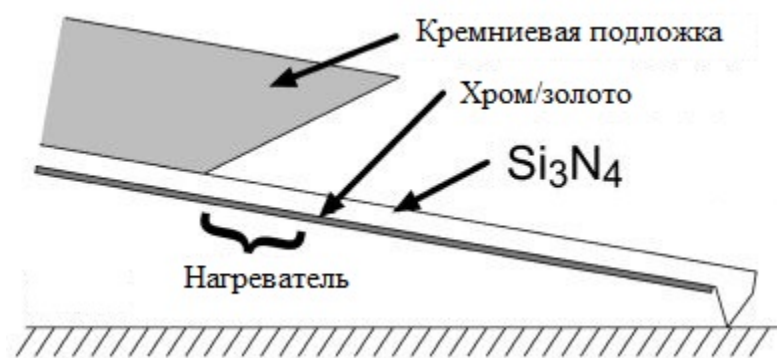


Рис. 18. Нагреваемый зонд

### Литература

1. YuguangCai, Benjamin M. OckoElectro Pen Nanolithography // Jacs Articles. – 2005. – №127. – С.16287-16291.
2. YuemingHuaMaterials and methods for nanolithography using scanning thermal cantilever probes – 2008.
3. Schubert U.S., Wouters D. Nanolithography and Nanochemistry: Probe-Related Patterning Techniques and Chemical Modification for Nanometer-Sized Devices // AngewandteChemie – 2004. – №43. – С. 2480-2495.
4. В.Л.Миронов. - Основы сканирующей зондовой микроскопии // Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений.: Нижний-Новгород, 2004.
5. Дедков Г.В., Канаметов А.А., Дедкова Е.Г. – Электростатические и вандер-ваальсовы силы в воздушном контакте зонда атомно-силового микроскопа с проводящей поверхностью // Журнал технической физики – 2009 ,т. 79, вып.12, С. 79-85.
6. Amar S. Basu, Shamus Mc Namara, Yogesh B. Gianchandani – Scanning thermal lithography: Maskless, submicron thermo chemical patterning of photoresist by ultracompliant probes // American Vacuum Society – 2004 – №22. – С. 3217-3220.
7. Takumi Ogino, Shinya Nishimura, Jun-ichi Shirakashi – Sub-20 nm Scratch Nanolithography for Si Using Scanning Probe Microscopy // Jpn. J. Appl. Phys.: 2007. – №46. – С. 6908 – 6910.
8. G. Ortega-Cervantez, G. Rueda-Morales, J. Ortiz-Lopez – CVD growth of carbon nanotubes on catalyst patterns generated with AFM lithography // Materials in Electronics – 2007. – №18. – С. 1163 – 1166.
9. Seunghun Hong, Jin Zhu, Chad A. Mirkin – Multiple Ink Nanolithography: Towarda Multiple – Pen Nano – Plotter // Science – 2009. – №286. – 523 – 525.
10. ChadA.Mirkin, SeunghunHong, LinetteDemers – Dip-Pen Nanolithography: Controlling Surface Architectureonthe Sub-100 Nanometer Length Scale // CHEMPHYSICHEM – 2001. – №2. – С. 37 – 39.

11. Yan Li, Benjamin W. Maynor, and Jie Liu – Electrochemical AFM “Dip-Pen” Nanolithography // Journal of the American Chemical Society – 2001. – №123. – С. 2105 – 2106.
12. Булатов А.Н., Неволин В.К., Строганов А.А. – Локальная модификация поверхности пиролитического графита методами туннельной литографии.: 2004.
13. Held R., Heinzl T., Studerus P., Ensslin K. Nanolithography by local anodic oxidation of metal films using an atomic force microscope // Physica. 1998. V. E. No 2. P. 748 – 752.
14. S. C. Minne, J. D. Adams, S. R. S. C. Minne, J. D. Adams, S. R. Manalis – Sub-Micron Lithography with the Sub-Micron Lithography with the Atomic Force Microscope // Quate Group, Stanford University.
15. <http://www.ntmdt.ru/>

УДК 53.05

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ В ВАКУУМЕ И АТМОСФЕРЕ

Петросян Г.А.<sup>(1)</sup>, Бредихин И.С.<sup>(2)</sup>*Студент 4 курса<sup>(1)</sup>, аспирант<sup>(2)</sup>**МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>(1)</sup>, Институт физики твердого тела<sup>(2)</sup>**Научный руководитель: Деулин Е.А.**Доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

### Введение

Процессы, происходящие при «сухом» трении представляют комплекс физико-химических процессов, природа которых разнообразна и вызывает дискуссии до сих пор. К таким явлениям относят процесс принудительного растворения сорбированного газа предсказанный в 1997 году [1]. Известно, что наличие водорода в стали резко снижает её твердость, пластичность и ударную вязкость, изменяет магнитные и электрические свойства стали. Кроме того, водород снижает усталостную и длительную прочность стали.

Авторами уже доказано, что в процессе «сухого» трения в вакууме, концентрация атомов водорода в материалах пары трения шарикоподшипника увеличивается в 100-300 раз по сравнению с исходной. Результаты экспериментов [2] приведенные на рис. 1 показывают увеличение концентрации дейтерия после трения-качения шариков по кольцу шарикоподшипника на глубине 0,8 мкм, при 2000 и 24000 об/мин.

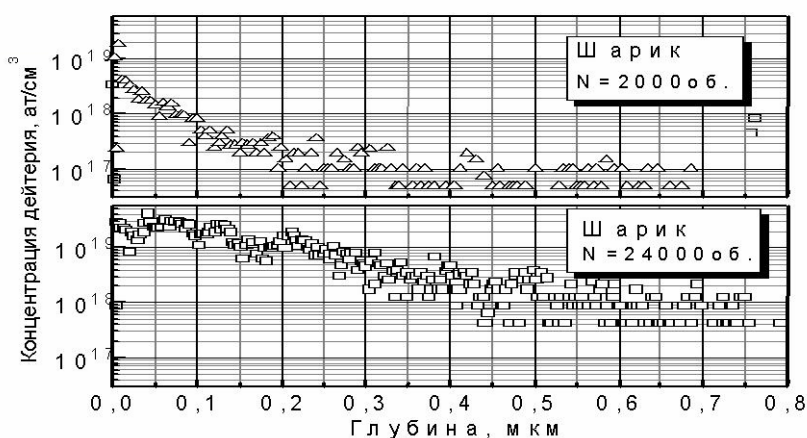


Рис. 1. Распределение дейтерия по глубине в шарике после 2000 и 24000 об/мин

Так же доказано [3], что в процессе «сухого» трения транспортируемого газа о стенку трубопровода наблюдается в той же мере (в 100-300 раз) увеличение концентрации водорода.

Далее представлены результаты новых экспериментов, проводимых для исследования результатов взаимодействия пары трения: «резец-заготовка».

### Методика экспериментов

Выдвигаемая авторами гипотеза основана на том, что в процессе механостимулированной сорбции растворение водорода и его изотопов сопровождается увеличением содержания водорода и его изотопов в сорбате [1,2].

Цель экспериментов – подтвердить гипотезу о появлении третьего изотопа водорода (трития) в материалах пары трения. Так как в отличие от других изотопов водорода содержания трития в природе ничтожно мало, и при этом тритий обладает радиоактивностью с периодом полураспада 12,5 лет, то эксперимент проводился с использованием радиометра-дозиметра МКС-01Р для определения бета излучения в зоне резания (рассматриваемое нами как процесс трения с экстремальными параметрами), которое затем сопоставлялось с фоновыми уровнями излучений.

### Результаты экспериментов

В результате эксперимента получено незначительное увеличение дозы излучения в зоне резания по сравнению с фоновым. Результаты приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Показания измерительных приборов при эксперименте**

А) Гамма излучение			
Фоновое излучение, мкЗв/час	Излучение при резании, мкЗв/час		
0.10	0.19	0.11	0.16
Б) Рентгеновское излучение			
Фоновое излучение, мкЗв/час	Излучение при резании, мкЗв/час		
0.11	0.13		

Для проверки справедливости гипотезы на наноуровне был проведен ВИМС анализ химического состава резца на установке TOF SIMS5 (рис.2).



Рис. 2. Работа на установке TOF SIMS5 в г. Черноголовка

Известно, что используемый авторами времяпролетный масс-спектрометр TOF SIMS 5 из всех видов поверхностной спектроскопии вторичных ионов обладает лучшими характеристиками. Он предоставляет детальную информацию об элементном и молекулярном составе поверхности и приповерхностных тонких слоях образца.

Задачей авторов являлось получение хотя бы косвенных доказательств увеличения уровня излучения приведенного в таблице 1. В результате ВИМС анализа было установлено, что концентрация трития в зоне трения превышала концентрацию трития в базовой области на 37%, так на рис. 3 представлен график зависимости количества атомов трития от глубины травления на базовой поверхности резца, ранее не участвующей в резании.

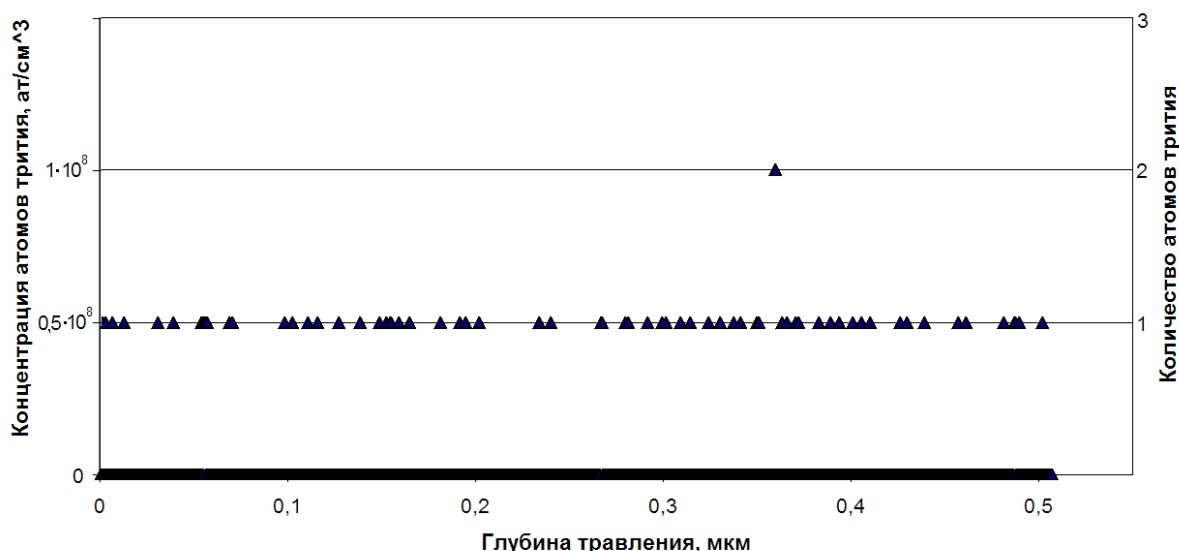


Рис.3. Зависимость концентрации атомов трития от глубины травления на базовой поверхности резца

Для сравнения на рис. 4 представлен график зависимости количества атомов трития от глубины травления на рабочей поверхности резца.

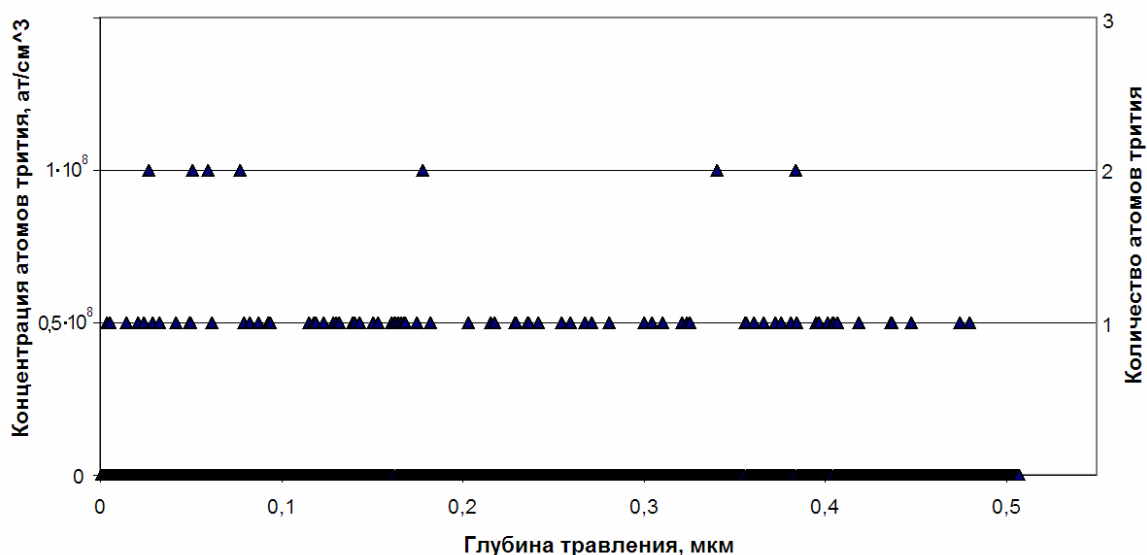


Рис.4. Зависимость концентрации атомов трития от глубины травления на рабочей поверхности резца

### Заключение

В результате экспериментов было получено косвенное доказательство появления в материалах пар трения третьего изотопа водорода, трития, подтверждаемое незначительным увеличением регистрируемой дозы излучения.

### Литература

1. *Deulin E.A.* Exchange of gases at friction in vacuum// ECASIA '97.- John Wiley & sons, Nov. 1997.- pp. 1170-1175.
2. *Deulin E.A., Nevshoupa R.A.* Deuterium Penetration Into The Bulk Of A Steel Ball Of A Ball Bearing Due To Its Rotation In Vacuum.- Applied Surface Science, 144-145, (1999), pp.268-268.
3. *Деулин Е.А., Мирзоев Абдуджаббор.М., Мирзоев Абдугаффор. М.* Исследование причин появления «водородной болезни» в материале труб магистральных газопроводов и разработка вакуумных методов их устранения / Нано-и Микросистемная Техника , №5 (94) 2008, с.с. 40-43.

УДК 53.05

## ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК

Расколец Елена Сергеевна<sup>(1)</sup>, Моисеев Константин Николаевич<sup>(2)</sup>

*Студентка 5 курса<sup>(1)</sup>, аспирант<sup>(2)</sup>,  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Ю.В. Панфилов,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»*

В работе были проведены исследования поверхности и характеристик полимерного материала ПМ-А, активированного в вакуумной установке ПРЭЛсИ и не активированного. Установлена зависимость между условиями обработки пленки (напряжение источника ионов, давление в рабочей камере, число проходов, рабочий газ) и параметрами шероховатости и фрактальной размерности, показано, что при исследовании образца пленки на атомно-силовом микроскопе, число точек сканирования влияет на точность получения данных (в данном случае данных параметра шероховатости). Кроме того, была проведена оценка зависимости параметра шероховатости пленки от угла наклона ионного пучка (по отношению к нормали) при ее обработке.

В настоящее время полиимидные пленки имеют широкое применение в науке и технике. Это связано с тем, что полиимидная пленка имеет отличные физические, химические и электрические характеристики, устойчивость к радиации, растворителям, перепадам температур, поэтому используется в качестве высокотемпературной изоляции погруженных электродвигателей для добычи нефти и тяговых электродвигателей для городского транспорта; изоляции трансформаторов, генераторов и конденсаторов; изоляции бортовых проводов и кабелей для авиации и космоса; подложек для гибких печатных плат и т.д. Полиимидные пленочные материалы (ПМ) находят свое применение в конструкциях космических аппаратов. Одна из областей их применения – использование ПМ-материалов в качестве электроизоляции фотоэлектрических преобразователей углепластиковых обшивок солнечных панелей. Широкие перспективы исследования и применения ПМ-материалов связаны с увеличением срока службы солнечных панелей, а, следовательно, и спутников.

В работе рассматривается возможность оптимальной обработки пленки с целью получения определенных значений параметров шероховатости и фрактальной размерности, необходимых для повышения адгезии (прочности при отслаивании пленки от углепластиковой обшивки

солнечной панели), эта проблема является нерешенной и актуальной на сегодняшний день; кроме того, в работе представлены результаты исследования образцов пленки на атомно-силовом микроскопе (AFM) с целью определения расхождения в данных, получаемых при сканировании образца в разном количестве точек сканирования, а также приведены данные по шероховатости полиимидной пленки, обработанной ионным источником под разными углами.

В качестве исходного материала выбрана полиимидная пленка ПМ-А 40x600, ТУ 6-19-121-85 производства предприятия ООО «НПП «Полиплен». Выбор материала обусловлен его устойчивостью к перепадам температур, к радиации и наличием подходящих физико-химических свойств.

**Таблица 1. Параметры материала**

Наименование показателей	Норма по ТУ
1. Ширина, мм, в пределах	600+/-10
2. Толщина и допускаемые отклонения по толщине, мкм в отдельных точках	40+/-4 40+/-8
3. Длина отрезков между технологическими швами, м, не менее	30
4. Прочность при разрыве, МПа, не менее а) в комнатной среде в продольном направлении в поперечном направлении б) в комнатной среде после выдержки образцов в течение 48ч. при температуре (300+/-5) С в продольном направлении в поперечном направлении	   147 137  98 98
5. Относительное удлинение при разрыве, %, не менее а) в комнатной среде в продольном направлении в поперечном направлении б) в комнатной среде после выдержки образцов в течение 48ч. при температуре (300+/-5) С в продольном направлении в поперечном направлении	   60 60  45 35
6. Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом*м, не менее а) в комнатной среде б) в сухой среде при температуре (250+/-3) С в) в комнатной среде после выдержки образцов в течение 24ч. в среде с относит. Влажностью (93+/-2)% и температурой (23+/-2) С	   10 <sup>14</sup> 10 <sup>11</sup> 10 <sup>13</sup>



7. Электрическая прочность, МВ/м, не менее	
а) в комнатной среде	
среднее значение	210
при минимуме	150
б) в комнатной среде после выдержки образцов в течение 24ч. в среде с относит. Влажностью (93+/-2)% и температурой (23+/-2) С	160
среднее значение	120
при минимуме	

Активация пленки проводится в ФГУП НИИ Вакуумной техники им. С.А.Векшинского в вакуумной установке ПРЭЛсИ (прямопролетная электронно-лучевая с ионной очисткой). Обработка пленки ведется ионными источниками с замкнутым дрейфом электронов. В результате обработки происходит очистка поверхности пленки от технологических загрязнений, ее обезгаживание и удаление адсорбированной воды, микрорельеф полиимидной пленки сглаживается. Все эти факторы приводят к увеличению адгезии клеевого соединения пленки с подложкой.

Исследование топографии поверхности образцов полиимидных пленок проводился на сканирующем зондовом микроскопе «ФемтоСкан» (ФГУП НИИ Вакуумной техники им. С.А.Векшинского) с максимальным полем сканирования 10 x 10 мкм в режиме атомно-силовой микроскопии.

**Таблица 2. Характеристики микрорельефа полиимидных пленок**

№ образца	Способ обработки	Дата обработки (дата снятия скана 08.2002г.)	Размер скана, мкм	R <sub>q</sub> , нм
Исходная	Не обрабатывалась		9,8 6 2,5	3,54 1,5 1,85
5-1	Обработана ионным пучком воздуха (P <sub>возд</sub> =6÷8·10 <sup>-4</sup> мм. рт. ст.) в два прохода: 1 проход: U <sub>разр</sub> =0,8 кВ 2 проход: U <sub>разр</sub> =1,1 кВ	23.01.2002 г.	2,5 10	3 13-16
4-5	То же	26.09.2001 г.	7,5 7	2,28 1,8

			0,9	0,36
4-1	То же	29.03.2001 г.	9 6 3,5 3,5 4,2 3,7	3,6 3,4 1,3 2,6 1,57 1,5
3-3	То же	13.02.2001 г.	8 1,8 1,8	7,5 2,4 14,5
Воздух	То же	25.09.2000 г.		
Азот	Обработана ионным пучком азота ( $P_{\text{возд}}=6\div 8\cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.) в два прохода: 1 проход: $U_{\text{разр}}=0,6$ кВ 2 проход: $U_{\text{разр}}=1,1$ кВ	10.10.2000 г.		
№2а (18.12.2002)	$D=27$ Кул/м <sup>2</sup> $I=100$ мА $U=1,4$ кВ $P_{N_2}=0,7\cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.	23.07.2002 г.	1,1 2,9 9	0,1831 0,57 0,78
№2	Не обрабатывалась	23.07.2002 г.	1 9	2,104 5
№3	$D=135$ Кул/м <sup>2</sup> $I=100$ мА $U=1,4$ кВ $P_{N_2}=0,7\cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.	23.07.2002 г.	1,1 8	0,307 1,37

Целью работы являлось выявление возможного влияния обработки ионами на морфологию поверхности полиимидной пленки и изменения морфологии поверхности обработанной пленки в процессе хранения. В работе исследовались образцы полиимидной пленки с различной обработкой и различными сроками хранения. Кроме того, рассматривался образец металлизированной полиимидной пленки с защитным слоем после натуральных испытаний. Защитный слой представляет собой вакуумное покрытие на основе диоксида кремния толщиной 0,4 мкм, нанесенное на часть поверхности образца. Образец был экспонирован на околоземной орбите в течение 377 календарных суток.

Для каждого образца были получены изображения поверхности в диапазоне размеров от 10 мкм до 1 мкм. Анализ полученных изображений

показал, что рельеф поверхности после обработки сглаживается, при этом значение шероховатости уменьшается на порядок и составляет десятые нанометров.

Что касается летного образца, то на участке поверхности с защитным покрытием, наблюдаются трещины, ширина которых составляет примерно 600 нм, а в остальном покрытие имеет четкую зернистую структуру, средний размер зерна составляет 120 нм.

Кроме того, для образца полиимидной пленки (материал ПМ-А-Дак, активация 31.10.08) было сделано 200, 20 и 10 сканов и сняты данные по шероховатости. Цель – показать насколько различаются полученные значение шероховатости при уменьшении числа точек сканирования, это поможет в дальнейшем определить оптимальное необходимое число сканов (и точек сканирования) для получения наиболее точных данных.

**Таблица 3. Результаты расчета для шероховатости**

i	j	n	Шероховатость $R_a, нм$	$\bar{Y}_i$	$S_i^2$	$S_y$	$t_{кр}$	M (Y)
1	1	20	5,75	6,67	40,6487	0,4508	1,9719	5,7779 < M(Y) < 7,5559
	2		2,42					
	...		...					
	n		9,15					
2	1	20	1,71	2,71	8,3319	0,6454	2,0930	1,3599 < M(Y) < 4,0617
	2		4,46					
	...		...					
	n		1,89					
3	1	10	4,13	2,37	1,2229	0,3497	2,2622	1,5805 < M(Y) < 3,1627
	2		1,24					
	...		...					
	n		2,03					

Таким образом, границы существования истинного значения параметров шероховатости определяются найденными доверительными интервалами, а значения, выходящие за их пределы, обусловлены наличием случайных факторов (повышенная влажность воздуха, работа установки, человеческий фактор и т.д.). Стандартное отклонение при различном количестве точек измерения n различно, чем выше n, тем больше дисперсия (действие случайных факторов) и тем выше точность измерения параметров.

Для оценки зависимости шероховатости от угла наклона источника ионов была взята неактивированная полиимидная пленка.

Активация проводилась на уснровке УВН в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Элионные технологии в машиностроении».

Было установлено, что при увеличении угла наклона ионного источника шероховатость уменьшается, поверхность сглаживается. Результаты отражены в Таблице 5.

**Таблица 4. Параметры обработки**

Давление предельное, Па	$5 \cdot 10^{-3}$
Давление рабочее, Па	$5 \cdot 10^{-2}$
Ток ионный, мА	100
Напряжение ускоряющее, кВ	4

**Таблица 5. Результаты**

Угол наклона (относительно нормали)	Шероховатость $R_q$ , нм
0°	9,972
30°	9,594
45°	5,485
60°	2,586

Полиимидная пленка служит в качестве экранно-вакуумной теплоизоляции, стабилизирует температуру станции, применяется для спутников, находящихся на низких орбитах, где много атомарного кислорода, разрушающего солнечные панели, поэтому нанесенный на пленку слой диоксида кремния является защитой от атомарного кислорода.

В связи с этим, возникает необходимость повышения прочности склеивания и увеличения адгезии полиимидной пленки. Было установлено, что прочность при отслаивании пленки от углепластиковой обшивки в исходном состоянии составляет менее 0,2 кг/см ширины. После обработки ионным пучком на установке ПРЭЛСИ адгезия возрастает в 3 раза и составляет 0,56-0,66 кг/см ширины, это происходит за счет того, что рельеф поверхности полиимидной пленки сглаживается, при этом значение шероховатости уменьшается.

### Литература

1. *Нестеров С.Б., Логинов Б.А., Зилова О.С., Сабирзянов Н.Р.* Сканирующие зондовые микроскопы // Издательский дом МЭИ. 2007. – С. 17-24.
2. *Бухарев А.А., Овчинников Д.В., Бухарева А.А.* Диагностика поверхности с помощью сканирующей зондовой микроскопии (обзор) // Заводская лаборатория. 1997. №5. С. 10-27.
3. *Арутюнов П.А., Толстихина А.Л.* Атомно-силовой микроскоп – универсальное средство измерения физических величин в мезоскопическом диапазоне длин // Датчики и системы. Измерения, контроль, автоматизация. 2000. №4. С. 39-48.
4. *Филонов А.С., Гаврилко Д.Ю., Яминский И.В.* Руководство пользователя пакета программного обеспечения для управления сканирующим зондовым микроскопом и обработки изображений «FemtoScan Online» // Центр перспективных технологий, М., 2001.

УДК 53.06

## **ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА И КОЭФФИЦИЕНТА ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОРБАТОМ**

Скрылев Александр Витальевич

*Студент 5 курса  
кафедры «Электронное машиностроение»  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Е.А. Деулин,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронное  
машиностроение»*

### **Аннотация**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента покрытия поверхностей сорбатов от коэффициента трения при 22° С и различных значениях влажности. Представленные результаты подтверждают создаваемую авторами теорию «сухого трения» и являются основой для создания прибора для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне и коэффициента покрытия. Приведена конструкция разрабатываемого датчика для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне и коэффициента покрытия поверхностей сорбатов.

### **Предпосылки создания**

Каталоги фирм в области вакуумной техники демонстрируют высочайшее разнообразие приборов для измерения остаточного давления, от которого разбегаются глаза. Ряд предлагаемых на рынке приборов имеет широкий (до 10 порядков давления) диапазон измерения вакуума. Технические решения подобных приборов заключаются в объединении в одном корпусе нескольких датчиков, обладающих узким (до 4-х порядков) диапазоном измеряемых давлений и основанных на разных физических принципах (теплопроводности, ионизации атомов и др.). Стоимость таких приборов на 1-2 тысячи долларов превышает суммарную стоимость традиционных датчиков, заменяемых подобными широкодиапазонными приборами.

В современных технологиях нанесения тонких пленок, сборки фотоэлектронных приборов (ФЭП), в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), в установках для экспериментальных термоядерных исследований типа «Токамак» и др. важно знать значение коэффициента покрытия поверхностей сорбатов для определения степени чистоты

поверхности, поскольку этот параметр является критичным, но для его прямого измерения в настоящее время не создано приборов, а рассчитывается он по известным уравнениям сорбции: Генри, Ленгмюра, БЭТ и др. Проблема использования подобного расчета заключается в том, что оценку коэффициента покрытия производят удаленно от исследуемой поверхности как по времени, так и по расстоянию.

На основе теории «сухого трения», создаваемой Деулиным Е.А., разработана конструкция датчика для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне давлений и коэффициента покрытия поверхностей сорбатом, который способен решить описанные выше проблемы современных технологий.

Принцип работы датчика основан на том, что при изменении остаточного давления, температуры, влажности и газового состава происходят не только количественные изменения сорбированного газа (коэффициента покрытия), но и качественные изменения в природе и характере трения [1]:

- в области давлений ( $10^5 - 10$ ) Па – доминирует «капиллярное трение»,
- в области давлений ( $10 - 1$ ) Па – сочетается действие капиллярного и вязкостного трения, т.е. имеет место «капиллярно-вязкостное трение»,
- в области давлений ( $1 - 10^{-1}$ ) Па – доминирует «вязкостное трение»,
- в области давлений ( $10^{-1} - 10^{-7}$ ) Па – доминирует «адгезионное» трение,
- в области давлений  $P < 10^{-7}$  Па – доминирует «когезионное» трение.

Создаваемый датчик основывается на функциональной зависимости коэффициента покрытия поверхностей сорбатом, остаточного давления и коэффициента трения [2]. Данная зависимость была исследована для пар трения металл-металл и диэлектрик-диэлектрик. Эксперименты показывают, что рассматриваемая зависимость применима также и в случае дифференцированного трения-скольжения, реализуемого в шарикоподшипнике [3]. Представленные диаграммы на рис.1 и рис.2 иллюстрируют эту зависимость.

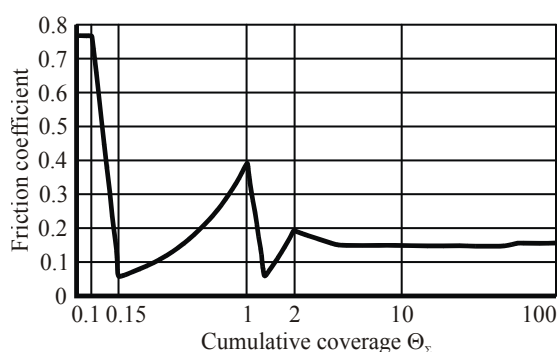


Рис. 1. Теоретическая зависимость коэффициента трения от коэффициента покрытия поверхностей сорбатом в паре трения Si – Si.

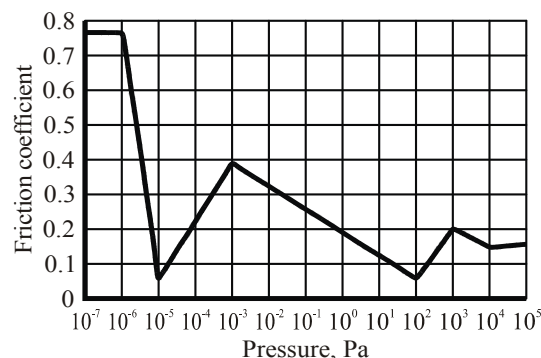


Рис. 2. Теоретическая зависимость коэффициента трения от остаточного давления в паре трения Si – Si

Экспериментальная зависимость коэффициента трения от коэффициента покрытия поверхности сорбатом и остаточного давления [4], представленная на рис. 3, хорошо отражает характер изменения теоретических кривых, представленных на рис.1 и рис.2, что позволяет проводить измерения коэффициента покрытия прямым методом.

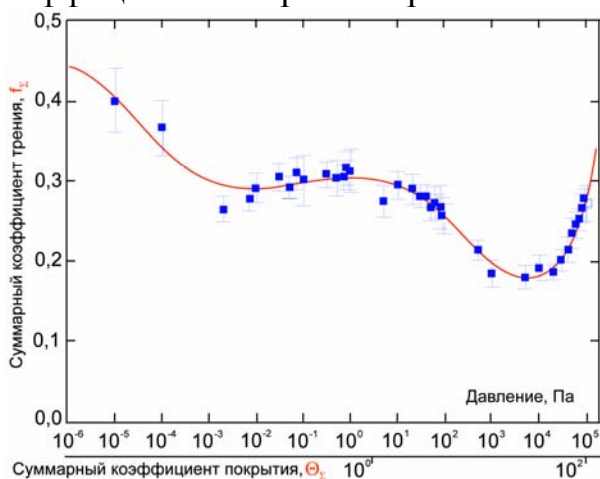


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента трения от коэффициента покрытия поверхности сорбатом в паре трения Si – Si.

### Методика проведения эксперимента

Задачей проводимых экспериментов было подтверждение справедливости представленных в теории «сухого трения» положений о функциональной связи коэффициента трения с коэффициентом покрытия, на которую, помимо остаточного давления (вакуума), влияют влажность и температура.

Исследования проводились на стенде, представленном на рис. 4, при температуре 22 °С и различных значениях влажности, которая регулировалась при помощи полиэтиленового колпака (рис. 5).

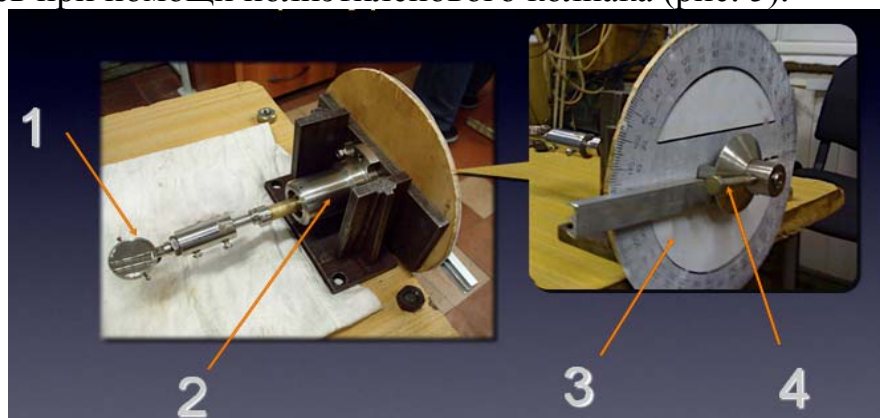


Рис. 4. Фотография экспериментального стенда

1 - кремниевая подложка, по которой должна скользить кремниевая пластинка; 2 - механизм передачи вращательного движения; 3 - неподвижно закрепленный диск с градусной шкалой; 4 - стрелка-указатель

Для достоверности получаемых результатов было принято решение проводить эксперименты на образцах подобных тем, которые использовались



в [4]. В результате были выбраны плоские кремниевые пластины, поверхности которых перед проведением эксперимента протирались спиртом.

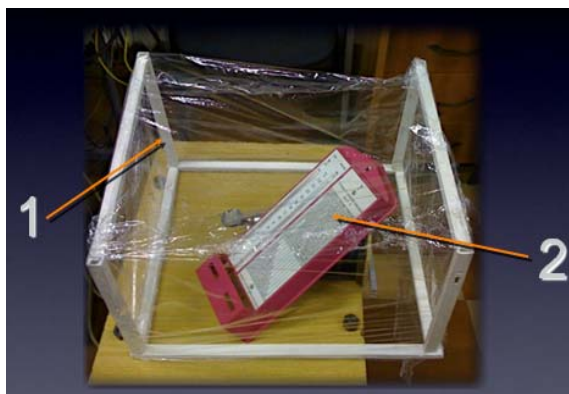


Рис. 5. Колпак на стенд, позволяющий проводить эксперименты с повышенной влажностью

1- каркас с полиэтиленовой пленкой, 2-психрометр для измерения влажности

Коэффициент трения также как и в [4] вычисляется по измеряемому углу наклона подложки по формуле:

$$f = \tan(\mu_i^j) \quad (1)$$

где:  $\mu_i^j$  - угол трения при  $i$ -том замере в  $j$ -том эксперименте;

Измерения коэффициента трения были проведены при влажности воздуха RH=30%, характерной для зимнего периода, и комнатной температуре T=22 °C. На рис. 6 представлена гистограмма, отображающая распределение значений угла и коэффициента трения в зависимости от количества измерений, при которых кремниевая пластинка начинала движение по подложке.

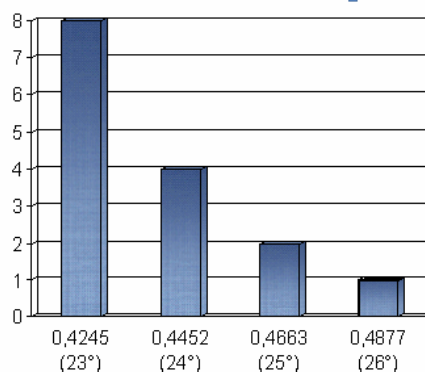


Рис. 6. Распределение количества повторов одинаковых значений коэффициента трения и угла поворота при RH=30 и T=22 °C

Среднее значение коэффициента трения при комнатной температуре (22°C) и влажности (30%) составило 0,4398, в переводе на градусную шкалу  $23 \square 42'$ .

Результаты экспериментов, проводившихся при повышенной влажности под полиэтиленовый колпаком, представлены на рис. 7.

Представленные на рис. 8 результаты пересчета влажности в коэффициент покрытия поверхностей сорбатом, можно заметить, что

характер изменения кривой аналогичен зависимостям, представленным на рис. 1 и рис. 3.

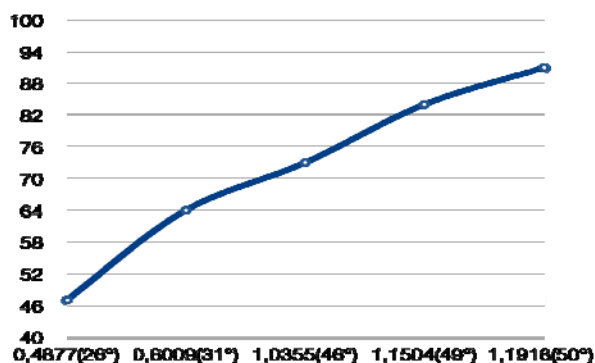


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от влажности.



Рис. 8. Зависимость коэффициента покрытия поверхности сорбатом от коэффициента трения при 22 С

## Выводы

Проведенные эксперименты подтверждают теорию так называемого «сухого трения» и являются предпосылками для создания прибора, в основе которого лежат описываемые в работе [4] явления. Для внедрения прибора в массовое производство, т.е. выхода на рынок приборов для измерения вакуума, и создания совершенно нового рынка приборов для измерения коэффициента покрытия поверхностей сорбатом, необходимо накопление практических знаний о том, что происходит на поверхностях при «сухом трении». Это является основной целью проведения экспериментов. Предполагается, что следующим шагом будет проведение аналогичных экспериментов, но уже в вакуумной камере, где будет исследоваться зависимость коэффициента трения и коэффициента покрытия поверхностей сорбатом от остаточного давления в широком диапазоне давлений. Эксперименты в прогреваемой камере позволят исследовать эту зависимость от температуры среды. Эксперименты с датчиком (рис. 9), находящимся уже в производстве (рис. 10), позволят начать выход на рынок вакуумной техники.

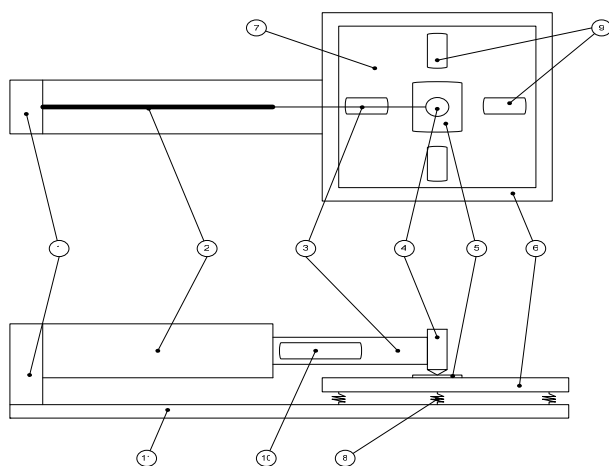


Рис. 9. Структурная схема датчика для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне давлений и коэффициента покрытия поверхностей сорбатов.

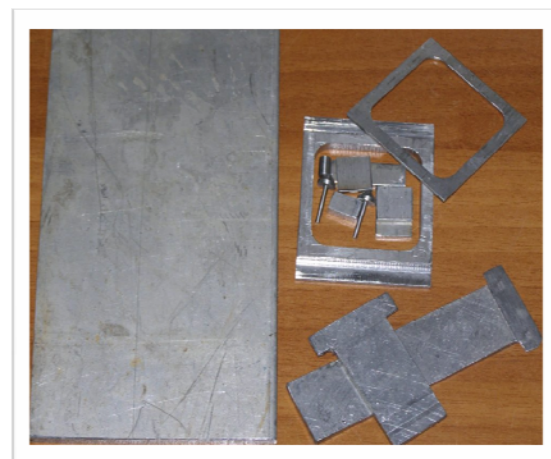


Рис. 10. Элементы датчика для измерения вакуума в сверхшироком диапазоне давлений и коэффициента покрытия поверхностей сорбатов.

### Благодарности

Авторы благодарят Федеральное агентство по образованию РФ за поддержку проведенных работ, выполненных в соответствии с государственным контрактом на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд П2421 от 19 ноября 2009 г. в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

### Литература

1. Patent of RF № 2316744. Deulin, E.A. A method of vacuum measurement. Bull. Inv.-10.02, 2008.
2. Deulin, E.A. The Role of Adsorbed Water Film For Sliding Friction of Smooth and Rough Surfaces. in Tribology - Science and Application Conference. 2004. Vienna.
3. Deulin, E.A., et al. Effect of Gas Adsorption on Tribology of Ball Bearings in Vacuum. in 15th International Colloquium on Tribology "Automotive and Industrial Lubrication". 2006. Stuttgart, Ostfildern: Technische Akademie Esslingen.
4. Deulin, E.A., A.A. Gatsenko, and A.B. Loginov, Friction force of smooth surfaces of SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> as a function of residual pressure. Surface Science, 1999. 433-435: p. 288-292.

УДК 621.793.06

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ САПР ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА**

Куликов Игорь Николаевич, Тетерук Дмитрий Владимирович

*Студенты 4 курса,  
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Сидорова С.В.  
Инженер, ассистент кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»*

### **Введение**

Необходимость применения универсального технологического вакуумного оборудования в условиях опытного (лабораторного) и мелкосерийного многономенклатурного производства влечет за собой ряд требований к проектированию его конструкции. Основной особенностью современных технологических установок является их модульность – возможность компоновки отдельных узлов (модулей) для реализации различных задач.

Цель данной работы заключается в демонстрации возможностей и наглядности трехмерного твердотельного моделирования для решения задач проектирования и анализа спроектированной конструкции на примере установки модульного типа (УМТ).

### **Моделирование УМТ**

В настоящей работе была спроектирована вакуумная установка модульного типа (рис. 1), предназначенная для проведения исследований в области формирования наноструктур в вакууме. Проектирование проводили в среде трехмерного твердотельного моделирования Autodesk Inventor Pro Suite 2010.

Важной особенностью УМТ является возможность применения различных модулей и методов нанесения покрытий (в том числе наноструктурированных): термовакuumное испарение (рис. 2), магнетронное распыление (рис. 3), газофазное осаждение и дуговой разряд. Реализация нескольких методов формирования тонкопленочных покрытий в конструкции одной технологической установки сопряжена с задачами,

решаемыми исследовательской группой кафедры «Электронные технологии в машиностроении».

Универсальность спроектированной вакуумной установки достигается благодаря применению в конструкции стандартных вакуумных фланцев, что дает возможность использовать любой тип насосов высоковакуумной откачки.



Рис. 10. Общий вид установки модульного типа

Реализована возможность использования кубической промежуточной камеры (рис. 4), которая позволяет одновременно использовать большее количество периферийных устройств по сравнению с цилиндрической. Вследствие этого можно проводить различные исследования без смены технологической оснастки.

Предусмотрены два варианта конструкции рабочей камеры: металлическая (нержавеющая сталь) и стеклянная (кварцевое стекло) (рис. 5).

Для наблюдения за процессом напыления в металлической камере предусмотрено смотровое окно. Стеклокammera удобна для наглядной демонстрации вакуумных методов напыления. Ее малый объем позволяет существенно снизить время откачки до выхода на рабочий режим.

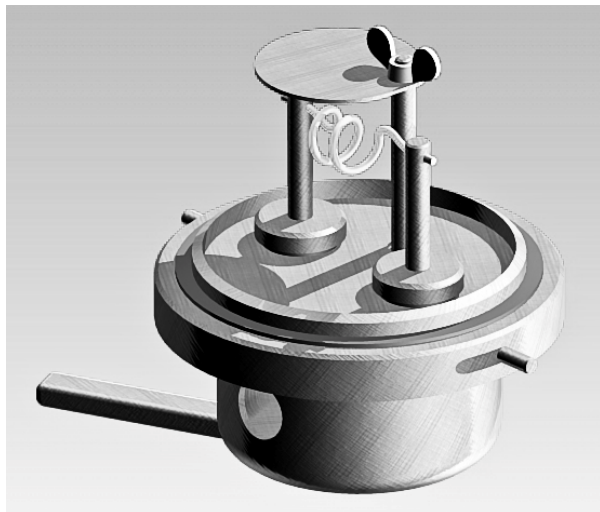


Рис. 2. Модуль термического испарения

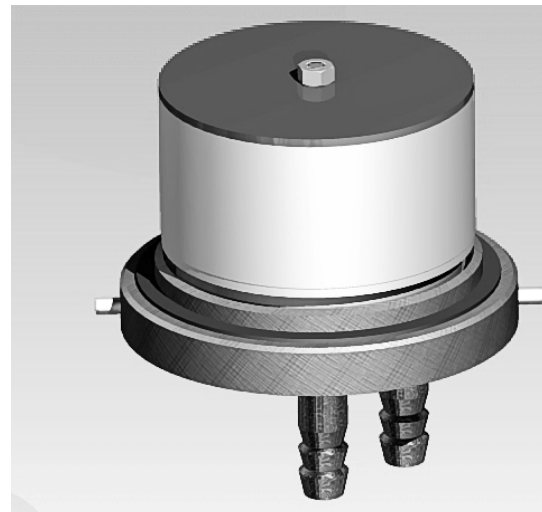


Рис. 3. Модуль магнетронного распыления

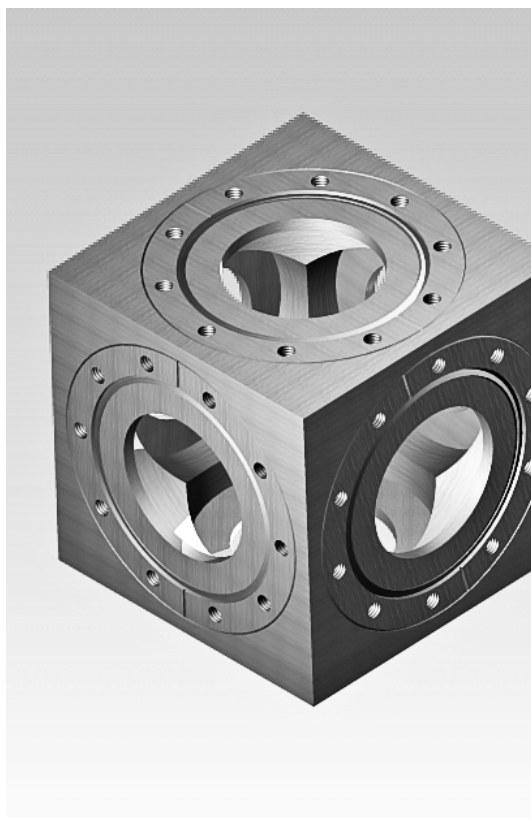


Рис. 4. Кубическая промежуточная камера



Рис. 5. Стеклокammera

## Расчет на прочность

Был произведен расчет вакуумной камеры на прочность. Он проводился в среде Ansys 12 методом конечных элементов.

Для создания модели нагружения камеры (рис. 6) были выбраны следующие значения сил нагружения (давлений):

- атмосферное давление  $10^5$  Па;
- давление внутри камеры 1 Па;
- вес нижнего фланца 2 кг (переведено в давление);
- вес верхнего фланца 1 кг (переведено в давление);
- сила затяжки бокового патрубка 10 кг (взят предельный случай).

```
1
NODAL SOLUTION
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
DMX =.237E-05
SMN =23311
SMX =.284E+07
SMXB=.327E+07
```

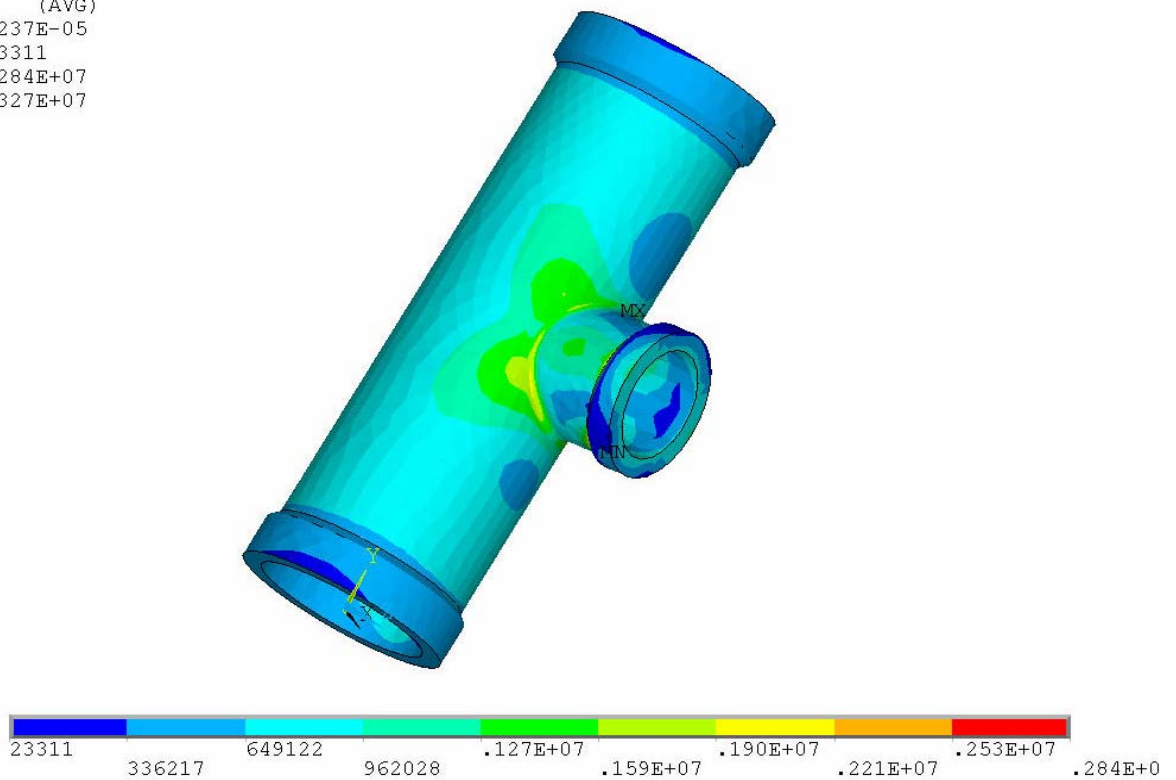


Рис. 6. Общий вид модели

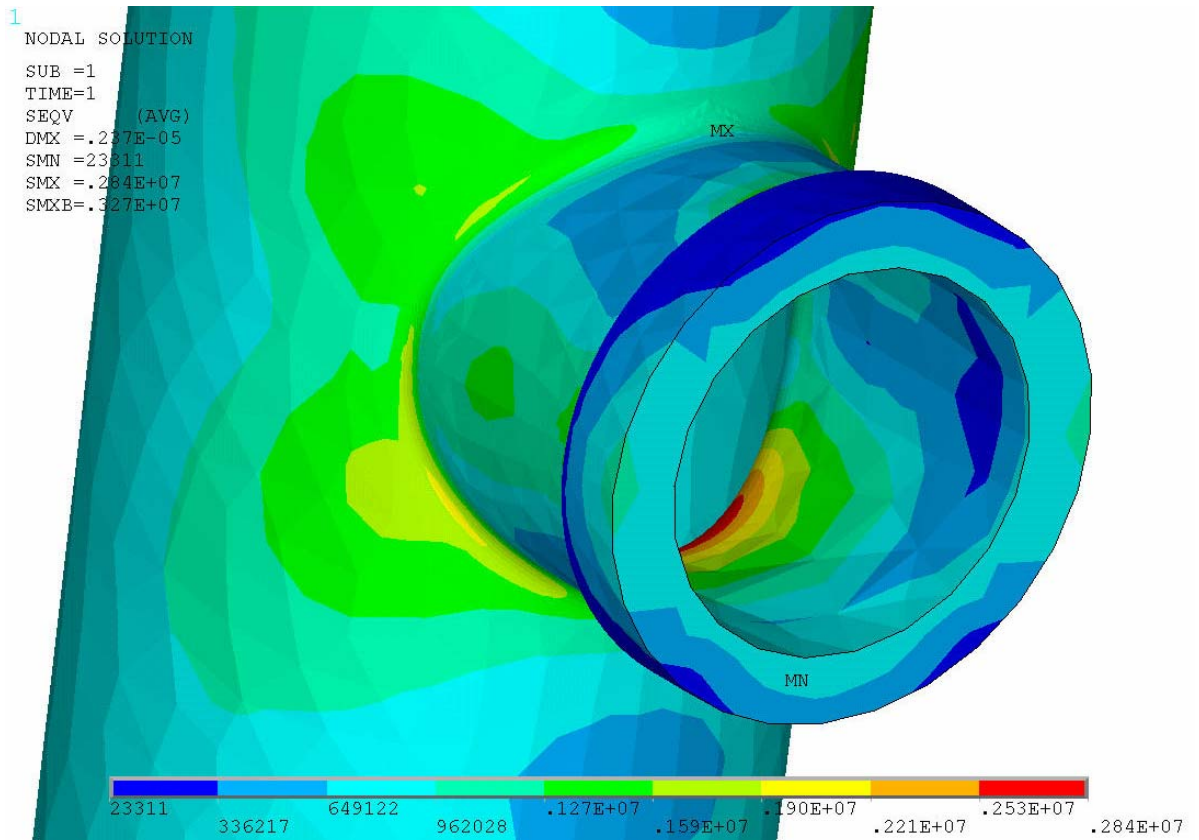


Рис. 7. Область максимальной нагрузки

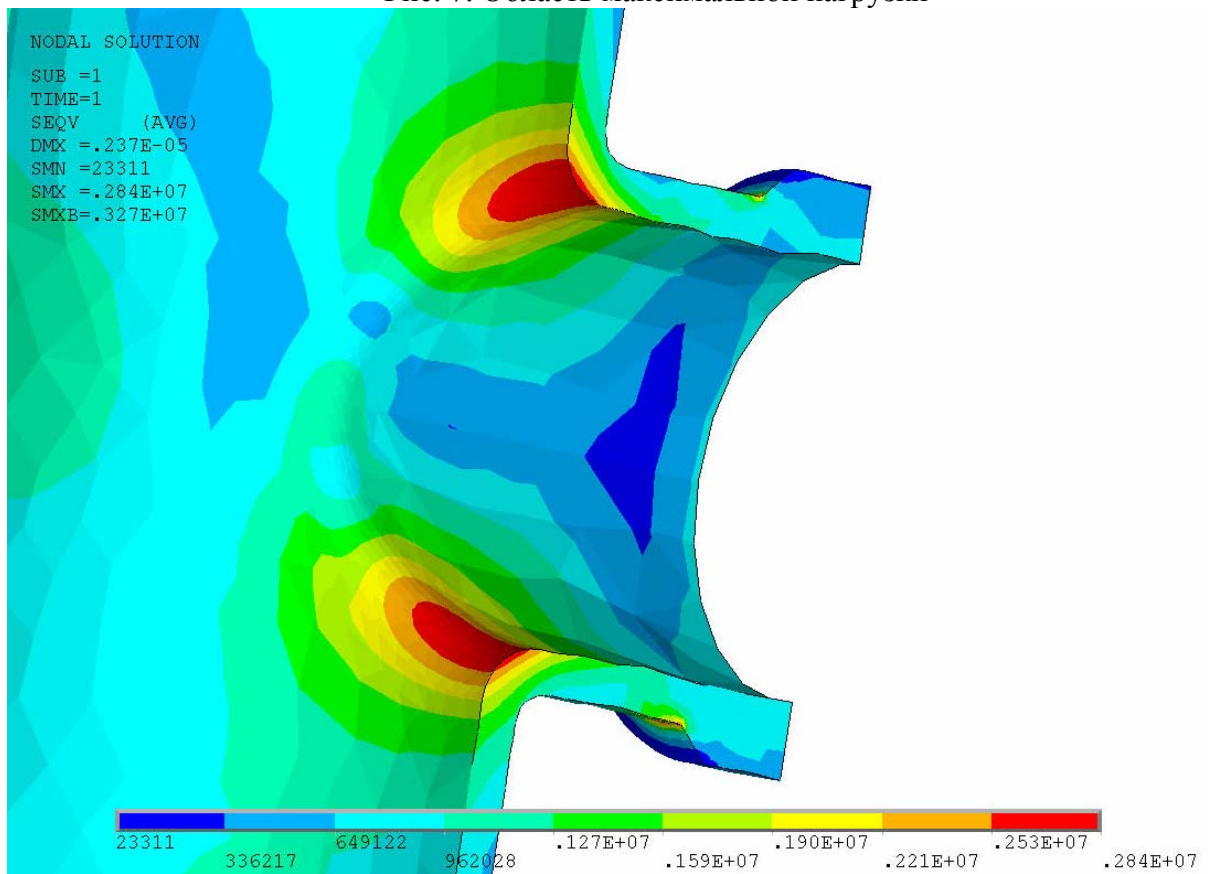


Рис. 8. Опасное сечение



## Заключение

В результате проделанной работы были выявлены:

- область максимальной нагрузки (рис. 7) вакуумной камеры;
- опасное сечение (рис. 8) – сопряжение бокового патрубка и основного цилиндра;
- получено значение критического напряжения в опасном сечении – 2,8 МПа.

Также был создан видео ролик, демонстрирующий порядок сборки узлов УМТ и ее модульность.

Необходимо отметить, что установка позволяет проводить исследования в следующих областях:

- нанесение тонкопленочных просветляющих покрытий;
- нанесение износостойких покрытий на металлообрабатывающий инструмент;
- нанесение тонкопленочных покрытий в производстве интегральных микросхем;
- формирование наноструктур как на плоских подложках, так и в развитых трехмерных структурах (например, в порах матриц синтетического опала и пористых материалов).

Из выше перечисленного следует, что данная установка вакуумного напыления модульного типа может применяться в различных областях машиностроения, приборостроения, микро- и наноэлектронике, оптоэлектронике.

Благодаря модульности спроектированной установки вакуумного напыления в зависимости от поставленной научной или технической задачи появляется возможность варьирования:

- технологическими модулями (методами нанесения тонкопленочных покрытий);
- насосами высоковакуумной откачки;
- конструкцией промежуточной камеры.

В результате возможности быстрой смены технологической оснастки (в т.ч. технологических модулей), могут быть решены вопросы отработки технологических процессов для производства изделий в перечисленных выше областях.

## Литература

1. *Панфилов Ю.В., Сидорова С.В., Чабанов А.А.* Вакуумная установка модульного типа для исследования процессов нанесения тонких пленок/ Тонкие пленки в электронике // Сб. докладов XX Международного симпозиума, М., МГТУ, 2007. С. 382–386.
2. *Жирных Б.Г.* Создание трехмерных моделей и чертежей деталей в Autodesk Inventor // Пособие для студентов, М., МГТУ, 2008.
3. <http://www.mdcvacuum.com>
4. <http://www.edwardsvacuum.com>
5. <http://www.leybold.com>

**Секция 11**  
**Лазерные технологии в машиностроении**

УДК 53.084.823

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ РПЭ (РПМ) ЛИ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОМОГЕНИЗАТОР ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ КАНАЛОВ ПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ  
ПИП.**

Абдрахманов Камиль Шамилевич

*студент 6 курса, очная форма  
Российская Федерация, г. Москва, Московский Государственный  
Технический Университет имени Н.Э.Баумана, кафедра «Лазерная техника  
и технология»*

*Научный руководитель: Ю.В. Голубенко  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерная техника и  
технология»*

Наличие многих типов лазеров, разнообразие режимов их работы, различие виды получаемого излучения накладывают дополнительные требования к измерениям пространственных параметров излучения, что приводит к усложнению оборудования и самих технологий измерений. В нашей стране эти исследования были затруднены в следствии отсталости материально-технической базы, отсутствием необходимых научных заделов. Старые ГОСТы не учитывали новых реалий развития лазерной, полупроводниковой и диодной техники. Ввиду этого в Российской Федерации с 2009 года вступают в силу несколько стандартов ГОСТ Р ISO, которые отменяют устаревшие нормативные документы, а также добавляют недостающей нормативной базы.

При использовании ГОСТ Р ISO 11146 мы наталкиваемся на целый ряд проблем, связанных с используемым оборудованием. Следует отметить, что большинство этих приборов построено на базе CCD камер с различным размером приемных матриц. При этом появляются новые трудности, связанные с самой матрицей. В современных матрицах производители включают функции антиблуминга, однако остается неизвестной степень перетекания зарядов из пересвеченных областей в соседние. Этот процесс может вносить существенные искажения в расчеты пространственных характеристик лазерного излучения. В то же время использование «универсальных» матриц, позволяющих на одном чипе снимать показания с разных длин волн, заставляет вносить в расчеты поправки на использование визуализаторов, что приводит к увеличению систематической погрешности. Помимо этого одним из ключевых моментов при расчетах согласно новому ГОСТ Р ISO 11146 является отсечение шумов и выбор базовой линии.

Решение этой задачи является трудоемкой и требующей сложного механизма обработки изображений.

Ввиду большого разнообразия лазерных систем, а также различного распределения плотности мощности (энергии) в поперечном сечении, были определены характеристики гомогенизатора, для возможности использования лазерных систем с различным характером излучения. Проведенные эксперименты показывают возможность создания эталонной базы с применением лазерных систем, имеющих различное пространственное распределение излучения.

Целью данных экспериментов было исследование распределения лазерного излучения, прошедшего через оптический цилиндр состоящий из МС10 и МС23.

Оборудование:

1. Лазер ГН-5
2. Телескоп СВЭ
3. ПЗС камера (240\*320 пикселей)
4. Ослабитель (МС 8, толщина 2 мм)
5. Фотометрический цилиндр

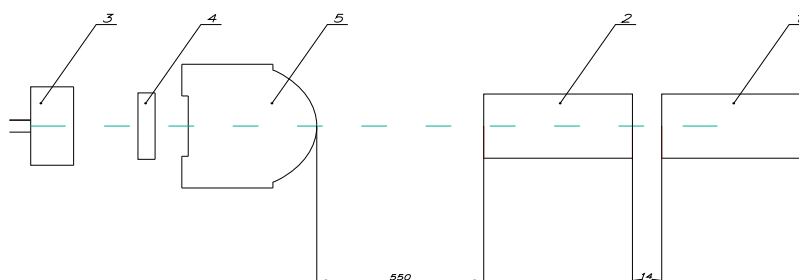


Рис.1 Схема установки для эксперимента

#### Эксперимент №1.

В данном эксперименте излучение через ослабитель подавалось на ПЗС камеру. При этом положение пятна на входе в камеру изменялось, что не привело к изменению распределения.

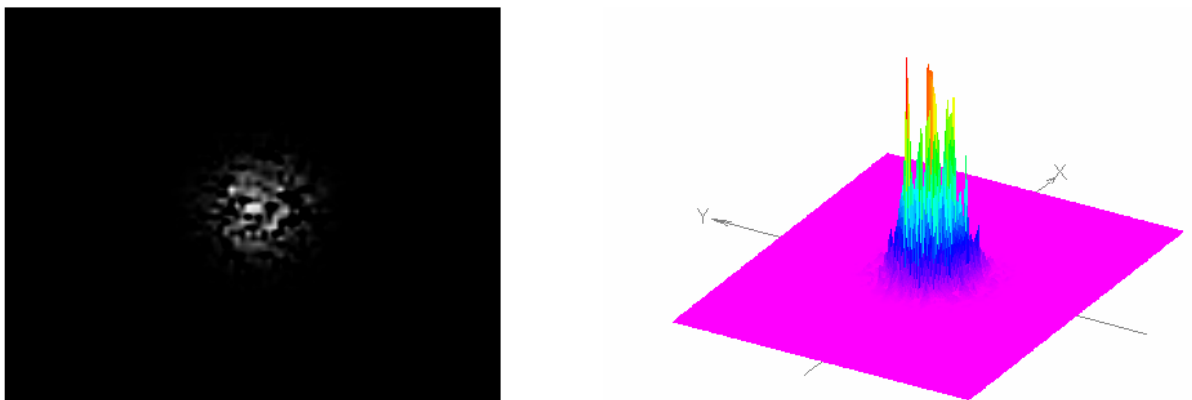


Рис.2 Излучение He-Ne лазера до преобразования.

### Эксперимент №2.

Между выходным окном и оптическим цилиндром на расстоянии 14 мм от лазера был установлен телескоп СВЭ, у которого была удалена собирающая линза. Рассеивающая линза установлена в положение №5. Расстояние между телескопом и оптическим цилиндром составляет 550 мм. Все дальнейшие эксперименты проводились при этих же размерах оптической системы. При помощи телескопа пятно с  $d = 1.2$  мм было увеличено до 15 мм.

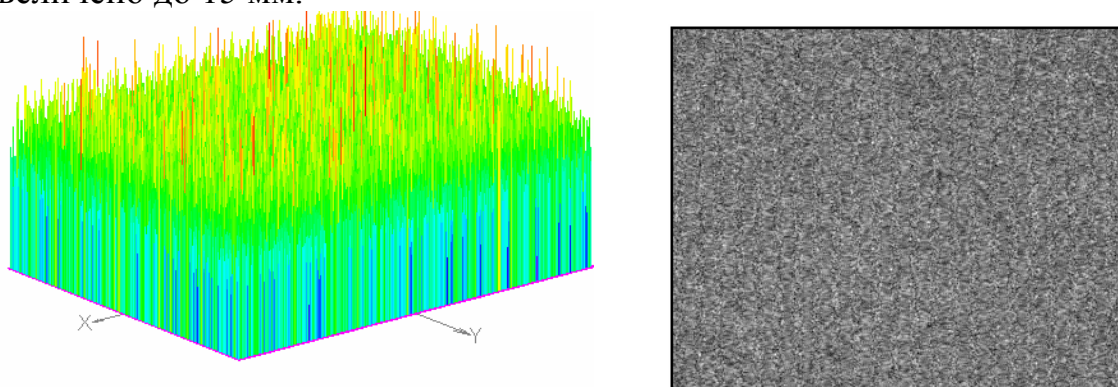


Рис.3 Излучение He-Ne после гомогенизатора

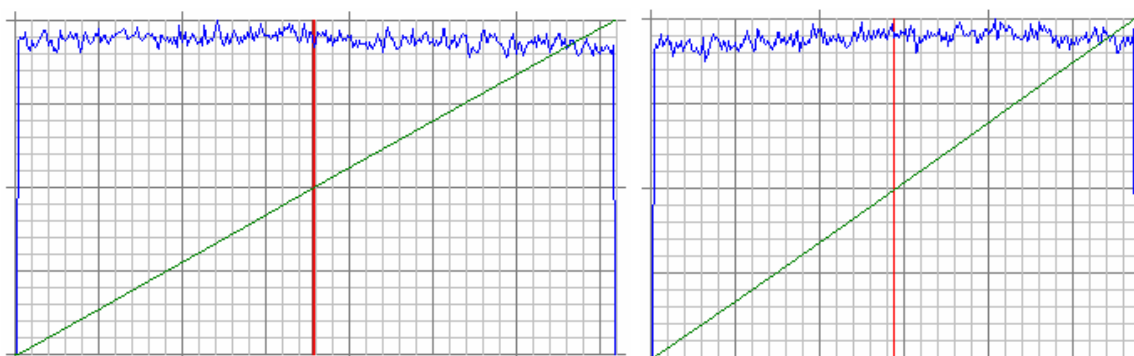


Рис.4 Распределение интенсивности по оси X (слева) и Y (справа)

### Эксперимент №3.

На защитное стекло матрицы было наклеено поглощающее покрытие черного цвета. Эксперимент проводился со снятой оптикой ПЗС камеры.

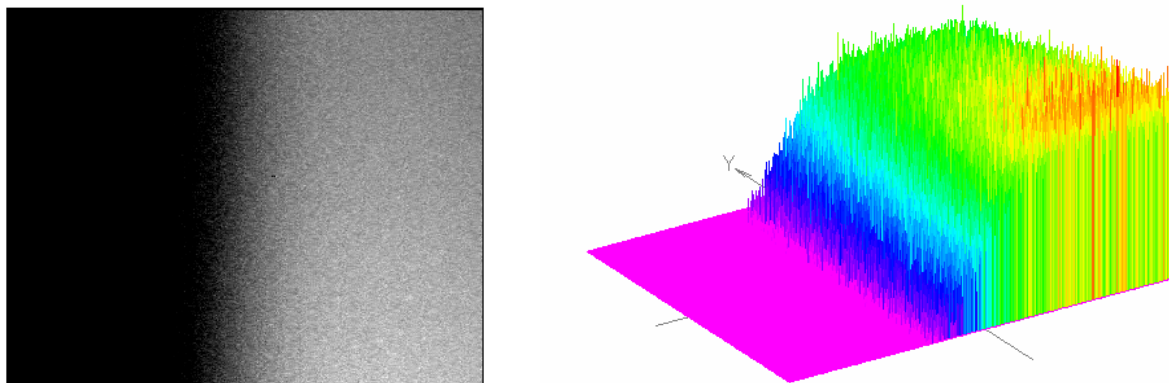


Рис.5 Изучение взаимовлияния каналов ПЗС приемника

### Литература

1. *А.Ф. Котюк, А.А. Либерман, М.В.Улановский.* Оптико-электронные измерения. // Сборник статей-М.:Университетская книга,2005.-130-142с.
2. *ГОСТ Р ISO 11146* «Методы измерений параметров лазерных пучков—ширин,углов расходимости и коэффициентов распространения—часть 3: геометрическая и присущая истинным пучкам лазерного излучения классификация, специфика их распространения, методики измерений».

УДК 53.084.823

## **РЕЗКА НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ**

Выродова Мария Александровна, Коека Юлия Дмитриевна

*Студенты 6 курса*

*Кафедра "Лазерные технологии в машиностроении"*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.В. Богданов*

*Кандидат технических наук, доцент кафедры "Лазерные технологии в машиностроении"*

### **Особенности модуляции излучения**

При работе с волоконным лазером имеется возможность модуляции излучения. При этом режим модуляции имеет свои особенности. Так, например, у используемого нами волоконного лазера ЛС-3,5 максимальная средняя мощность равна 3500 Вт. При этом максимальная мощность импульсно-периодического излучения также равна 3500 Вт. Таким образом, при применении режима модуляции лазерного излучения средняя мощность снижалась.

Устройство, которое использовалось для модуляции излучения, создавало длительности импульса от одной десятой периода ( $1/10$ ) до девяти десятых ( $9/10$ ) периода с шагом, равным десятой периода. Частота модуляции могла изменяться от 0 до 5 кГц, т.е. минимальный период повторения импульса составлял 0,0002 с.



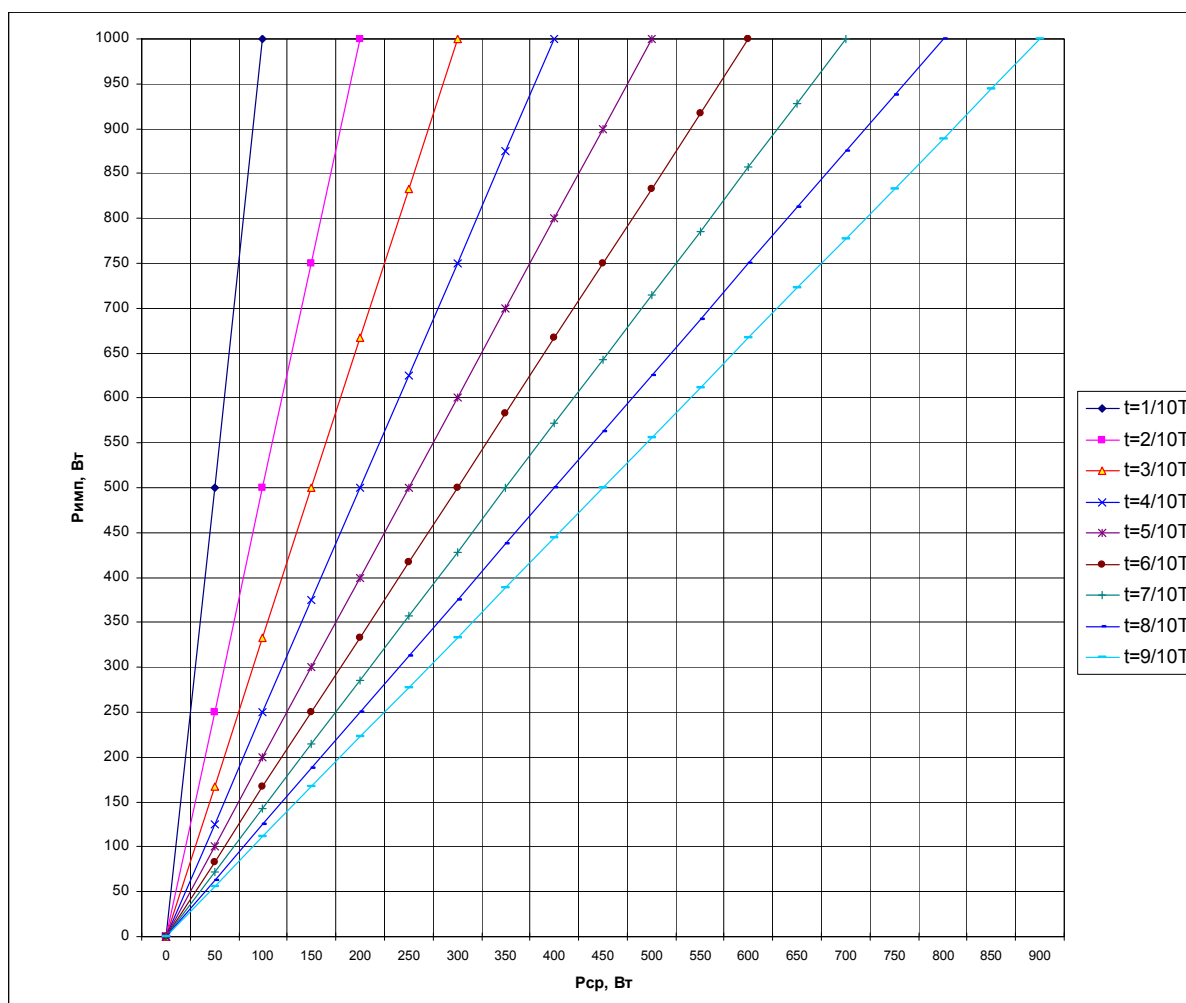


Рис. 1. Зависимость средней мощности излучения в импульсно-периодическом режиме от пиковой мощности и настройки модулирующего устройства

### Описание эксперимента

Для проведения исследования была выбрана частота повторения импульсов 1000 Гц. Изменялось только соотношение: длительность импульса - длительность паузы. Лазерная установка ЛС-3,5 укомплектована сварочным волокном диаметром 100 мкм. Фокусное расстояние оптической системы составляло 150 мм, заглубление фокуса – 0,5 мм, режущий газ – воздух, давление газа – 6 атм. Выходная мощность контролировалась по встроенному в лазер измерителю мощности. Для перемещения образцов использовался технологический комплекс портального типа.

### Результаты

Результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Полученные результаты

№	Длительность импульса	Мощность импульса	Средняя мощность	Скорость, м/мин	Ширина реза, мкм	ЗТВ, мкм	Грат, мкм
1	0,1 Т	3500	350	2,04	320	253	93
2	0,1 Т	3500	350	2,4	240	160	107
3	0,2 Т	2800	560	2,04	320	267	133
4	0,2 Т	2800	560	2,4	320	267	160
5	0,2 Т	2800	560	3,06	333	227	67
6	0,2 Т	2450	490	3,06	307	213	80
7	0,2 Т	2450	490	2,4	267	267	120
8	0,2 Т	2100	420	2,4	267	240	133
9	0,2 Т	1750	350	2,4	253	227	80
10	0,2 Т	1925	385	2,4	240	200	107
11	0,2 Т	1925	385	2,04	293	267	200
12	0,2 Т	1750	350	2,04	253	213	107
13	0,2 Т	1575	315	2,04	240	200	93
14	0,3 Т	1400	420	2,04	307	173	40
15	0,3 Т	1225	367,5	2,04	253	133	27
16	0,3 Т	1155	346,5	2,04	187	160	93
17	0,3 Т	1295	388,5	2,04	253	240	213
18	0,5 Т	1050	525	2,04	293	200	107
19	0,5 Т	875	437,5	2,04	267	213	53
20	0,5 Т	805	402,5	2,04	187	200	53

## Полученные зависимости

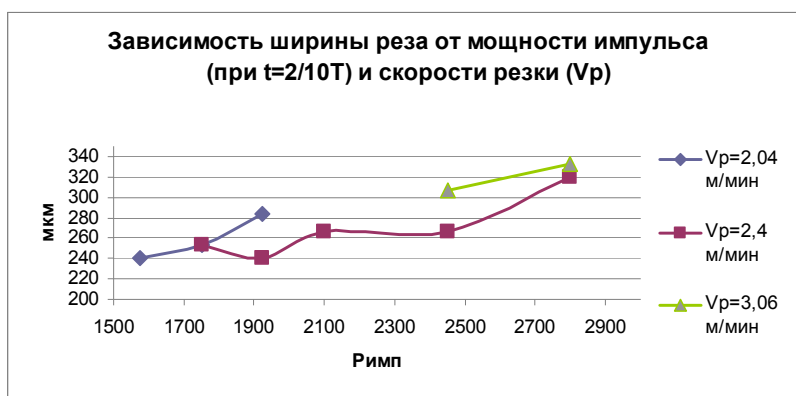


Рис. 2. Зависимость ширины реза от мощности импульса и скорости резки.

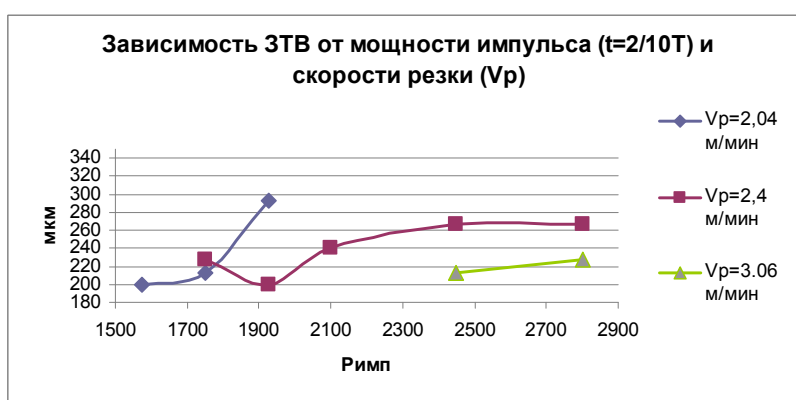


Рис. 3. Зависимость ЗТВ от мощности импульса и скорости резки.

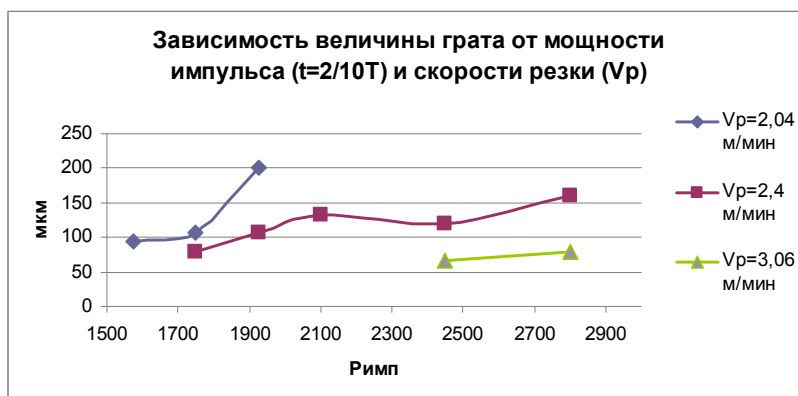


Рис. 4. Зависимость высоты грата от мощности импульса и скорости резки.

### Внешний вид образцов



Рис. 5. Образец с наилучшим качеством реза (№15). Вид с внешней стороны.



Рис. 6. Образец с наилучшим качеством реза (№15). Вид с обратной стороны.



Рис. 7. Внешний вид реза (заметна бороздчатая структура реза).



Рис. 8. Большой грат. Образец №18.

Таким образом, экспериментально было подтверждено, что при увеличении мощности растут ширина реза, грат и ЗТВ, а при увеличении скорости уменьшаются. При этом наилучшие результаты по качеству реза были получены при длительностях импульса, равных 0,3-0,5 периода.

Наилучшие результаты с незначительной разницей качества реза:

1) При  $R_{имп}=1225$  Вт,  $R_{ср}=367,5$  Вт и длительности импульса  $t_{имп}=3/10T$ ;

2) При  $R_{имп}=1155$  Вт,  $R_{ср}=346,5$  Вт и длительности импульса  $t_{имп}=3/10T$ ;

При  $R_{имп}=805$  Вт,  $R_{ср}=402,5$  Вт и длительности импульса  $t_{имп}=5/10T$

### Литература

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. , Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г.Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2006. – 664с.
2. Лазерная техника и технология. В 7- ми кн. Кн. 2. Инженерные основы создания технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов/ Голубев В.С., Лебедев Ф.В.; Под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Высшая школа, 1988. - 176 с.

УДК 621.375.826

## **АДАПТАЦИЯ МЕТОДИК ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Попов Кирилл Леонидович, Куликов Иван Валерьевич, Баландина Любовь Николаевна

*Студенты 3 курса*

*Кафедра МТ-12*

*Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э. Баумана*

*Научные руководители: Ю. В. Голубенко<sup>(1)</sup>, А. В. Богданов<sup>(1)</sup>, Д. М. Мельников<sup>(2)</sup>.*

*Кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-12<sup>(1)</sup>, аспирант 1 года<sup>(2)</sup>.*

В настоящее время достаточно важной проблемой при конструировании лазерных систем является корректный подбор и других параметров лазерных систем. Здесь надо заметить, что выбор таких параметров может быть очень трудоёмкой задачей, так как для каждого типа процессов лазерной обработки необходимы определённые характеристики фокусировки луча. Речь идёт о том, для различных процессов требуется уникальная комбинация диаметра пятна в фокусе, длины перетяжки и фокусного расстояния. Факторы, которые, в конечном счёте, определяют эти параметры, так же определяют характеристики структурных составляющих лазерного комплекса.

В своей работе мы выбрали два принципиальных типа лазерных систем – волоконных лазер (мы рассмотрели этот тип на основе установки ЛС – 3.5, вследствие малой изученности проблемы обобщать полученные нами данные для всего спектра волоконных лазерных систем не представляется возможным) и классическую схему твердотельного лазера на примере активного элемента из алюмоиттриевого граната с неодимом.

### *Волоконные комплексы.*

Волоконная оптика это одно из наиболее быстро развивающихся направлений современной лазерной физики. Успехи этого направления связаны с проведением широких комплексных фундаментальных исследований, которые обеспечили не только создание волоконных световодов с предельно низкими потерями, но и уникальных источников когерентного излучения в необходимом спектральном диапазоне. Однако требование увеличения скорости передачи и обработки информации ставит на повестку дня необходимость создания оптических каналов передачи информации со спектральным уплотнением. Именно на решение этой

проблемы в значительной мере и направлены усилия ученых. Дальнейший прогресс невозможен без детальных фундаментальных исследований в области разработки новых элементов систем связи: высокоэффективных источников оптического излучения, оптических усилителей и волоконных световодов.

Волоконная оптика в настоящее время получила широкое развитие и находит применение в различных областях науки и производства (связь, радиоэлектроника, энергетика, термоядерный синтез, медицина, космос, машиностроение, летающие объекты, вычислительные комплексы и т. д.).

Методика расчёта фокусирующих систем волоконных лазеров отличается от традиционных методик расчётов твердотельных лазеров, что связано с существенными отличиями в принципах работы и строением оптического тракта. Поставлена цель: разработать методику расчёта фокусирующей системы волоконного лазера, учитывающую данные особенности.

Оптический тракт волоконного лазера отличается от принципиальной схемы твердотельных лазеров. Его принципиальная схема представлена на рисунке 1.

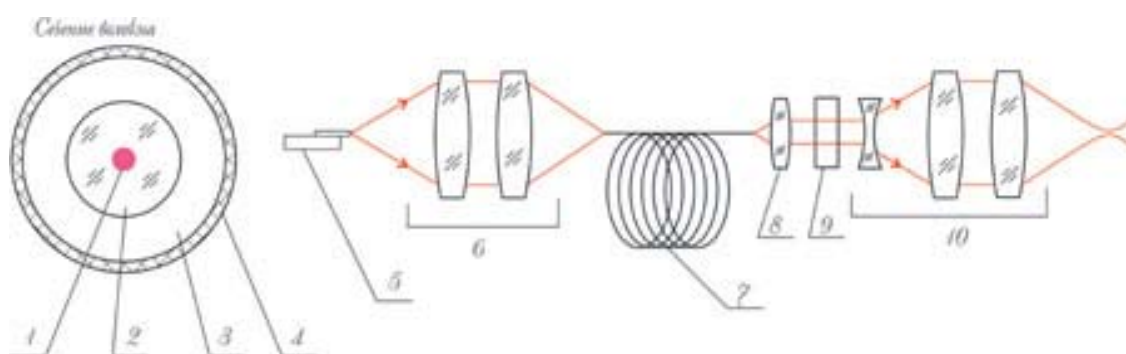


Рис. 1 Принципиальная схема волоконного лазера (1 — сердцевина, легированная металлом, диаметр 6–8 мкм; 2 — кварцевое волокно, диаметр 400–600 мкм; 3 — полимерная оболочка; 4 — внешнее защитное покрытие; 5 — лазерные диоды оптической накачки; 6 — оптическая система накачки; 7 — волокно (до 40 м); 8 — коллиматор; 9 — модулятор света; 10 — фокусирующая оптическая система)

Как видно из рисунка волоконный лазер представляет из себя транспортировочное волокно, коллиматор и фокусирующую систему. Так же виден состав непосредственного волокна. Более подробное изображение волокна представлено на рис. 2.



Рис. 2 Строение волокна лазера

В настоящее время на рынке оптических систем представлено большое количество разнообразных видов фокусирующей оптики, коллиматоров и других оптических компонентов. Все они имеют различные характеристики и параметры. Поэтому встает вопрос оптимизации подбора каждого элемента исходя из характеристик лазера и требуемых параметров процесса. Поэтому было принято решение исследовать излучение волоконного лазера и выявить общую зависимость для более удобного подбора оборудования. Для этого был проведен расчёт фокусирующей системы, в ходе которого была выявлена зависимость диаметра пучка лазерного излучения в фокусе от расходимости и мощности излучения выходящего из коллиматора. Данная зависимость, а так же значение одной из основных характеристик транспортировочного волокна – числовой апертуры, позволили провести подбор оптимального коллиматора для требуемых характеристик пучка.

Одной из важнейших зависимостей, определяющих конечные параметры пучка, является зависимость распределения энергии по сечению пучка от мощности излучения. Нами были проведены исследования по изучению данной зависимости (стоит отметить, что для испытываемой модели лазера излучение являлось изначально многомодовым). В экспериментах использовался волоконный лазер компании ИРЭ «Полюс» ЛС-3,5. Данное исследование проводилось методом двух сечений, для излучения, выходящего из коллиматора. Распределение мощности по сечению пучка контролировалось для различных модулей накачки лазера и их комбинаций с варьирования уровня мощности излучения.



Рис. 3 Схема эксперимента



По итогам экспериментов, при использовании методов статистического анализа, было достигнуто понимание того, как распределяется энергия в пучке мощного волоконного лазера.

Для обработки экспериментально-полученных значений необходимо знать, что радиально-симметричный пучок лазерного излучения описывается местоположением перетяжки пучка  $Z_0$ , диаметром пучка в перетяжке  $V\sigma_0$ , углом расходимости пучка « $V\sigma$ » в дальней зоне. Перетяжкой пучка измеряется его сечение с минимальными полезными размерами. Зная эти параметры можно для углов расходимости менее 0,8 рад записать уравнение распространения пучка вдоль его оси  $Z$ :  $d_\sigma^2(Z) = d_{\sigma_0}^2 + (Z - Z_0)^2 V_0^2$ . Где  $Z_0$  - положение перетяжки от начала оси  $Z$  (Обычно начало оси  $Z$  совпадает с выходом излучения).

Качество пучка в процессе его распространения будем, аналогично [100] характеризовать показателем (коэффициентом) « $K$ » распространения пучка или обратной ему величиной  $M^2$ , являющейся мерой близости произведения параметров измеряемого пучка к аналогичному произведению для идеального гауссова пучка. Поэтому появилось выражение «критерий  $M^2$ ». Для гауссова пучка с одной модой TEM<sub>00</sub> значение  $M^2=1$ .

Величины  $K$  ( $M^2$ ),  $d\sigma_0$  и  $V_\sigma$  связывает выражение:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda_0}{\pi} \cdot \frac{1}{n \cdot d\sigma_0 \cdot V_\sigma} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{d\sigma_0 \cdot V_\sigma}, \text{ где: } \lambda_0 - \text{длина волны в вакууме; } \lambda -$$

длина волны в среде с « $n$ ». Произведение  $nd\sigma_0 V_\sigma = \frac{4\lambda_0}{K\pi} = \frac{M^2 \cdot 4\lambda_0}{\pi}$  является инвариантом распространения пучка лазерного излучения в безабберационной среде в отсутствие ограничивающих его диафрагм.

При измерении пространственно-электрических характеристик лазерного излучения решаются, как правило, четыре задачи определения: ширины и диаметра пучка, угла расходимости пучка, коэффициента распространения « $K$ » или коэффициента превышения дифракционного предела  $M^2 = \frac{1}{K}$ , Координаты расположения перетяжки пучка. Для определения диаметра пучка  $d\sigma(Z)$  следует измерить распределение плотности мощности энергии в сечении пучка  $x'$  и  $y'$  с координатой  $Z$  и при этом найти азимутальный угол  $\varphi$  между осью « $x$ » пучка и осью « $x'$ » лабораторной системы координат. Для определения  $V_\sigma$  - угла расходимости пучка в дальней зоне – необходимо использовать безабберационный фокусирующий оптический элемент с фокусным расстоянием  $f$ . Измерению подлежит диаметр  $d\sigma_f$  пучка в точке оси, расположенной на расстоянии  $f$  от задней главной плоскости фокусирующего элемента. Угол расходимости

лазерного пучка рассчитывается по формуле  $V_{\sigma} = \frac{d\sigma_f}{f}$ . Для определения  $K$  или  $M^2$  необходимо найти диаметр перетяжки  $d\sigma_0$  и углы расходимости  $V_{\sigma}$ . Для определения координаты «Z» расположения перетяжки пучка необходимо учитывать параметры распространения излучения и использовать аппроксимирующие формулы.

В качестве измерителя мощности излучения использовался измеритель на базе термоголовки Ophir 5000 W

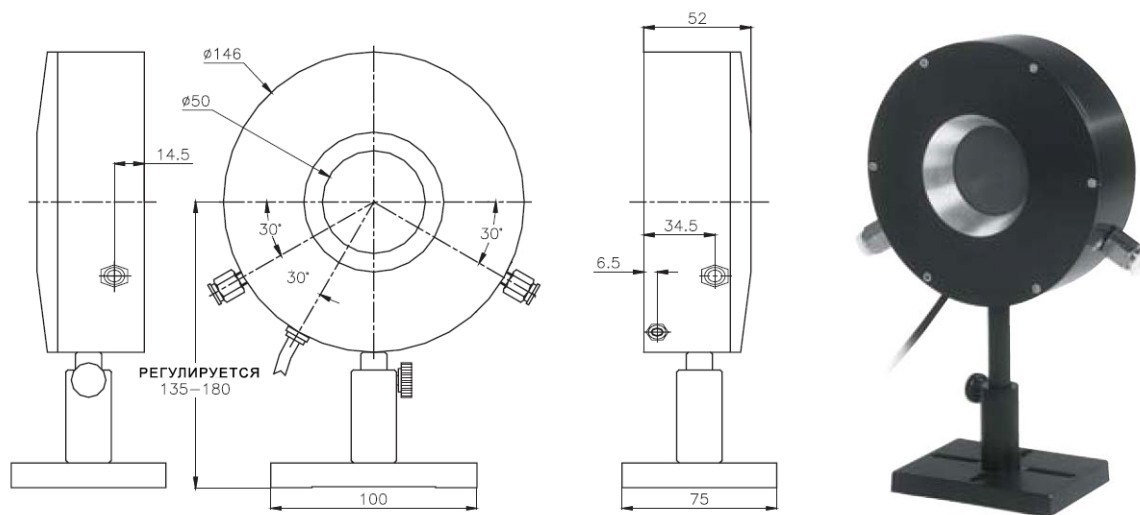


Рис. 4 Измеритель мощности

По результатам экспериментов и статистического анализа, было построено семейство графических зависимостей, пример которых представлен на рис. 5.

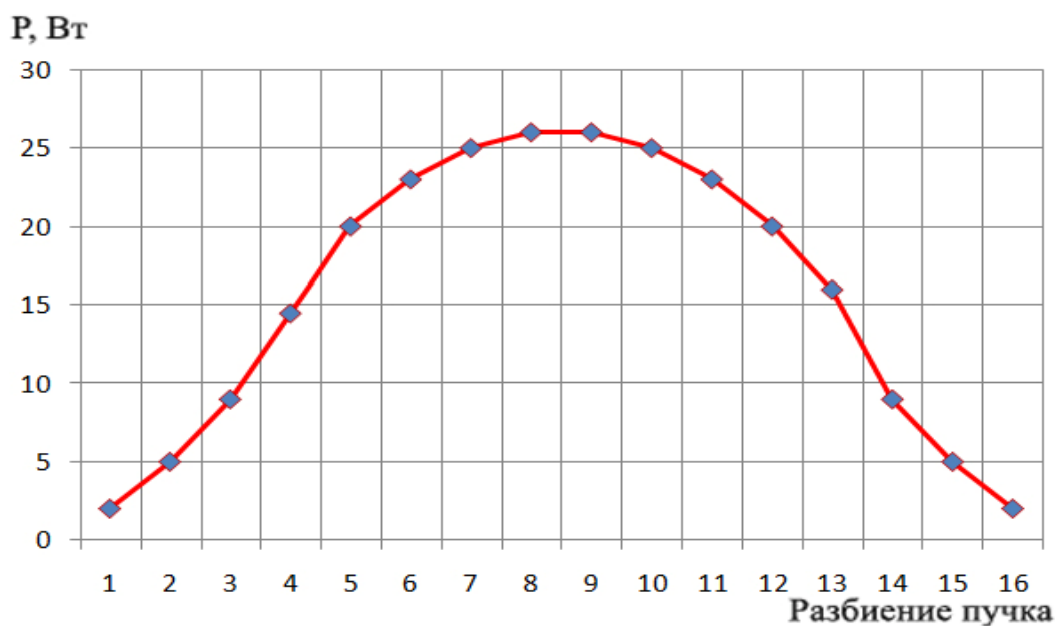


Рис. 5 Пример распределения мощности излучения по сечению пучка

При анализе итогов вышеизложенных мероприятий стало ясно, что распределение мощности излучения по сечению пучка практически не

зависит от мощности излучения, что позволяет не учитывать её при подборе оптической системы. Так как такая зависимость ранее трудно поддавалась численному представлению, исключение её из расчёта при подборе оптической системы может позволить значительно приблизить расчётные данные к реальным [2,3].

К основным параметрам волоконного световода относятся диаметр сердцевины  $2a$ , диаметр оболочки  $2b$ , числовая апертура  $NA$ , оптические потери  $\alpha$ , длина  $L$ . В зависимости от типа волоконного световода диаметр сердцевины может составлять от 1 до 100 мкм, диаметр оболочки – от 100 до 1000 мкм. Для световодов, используемых в оптических линиях связи, диаметр сердцевины около 10 мкм, оболочки – 125 мкм.

Понятие числовой апертуры связано с максимальным углом  $\varphi_c$  между лучом, введённым в световод, и осью световода, когда излучение «захватывается» волноводной структурой ( $\varphi_c = 90^\circ - \theta_c$ ):  $NA = \sin \varphi_c \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Лучи, введённые в световод под углами больше  $\varphi_c$ , не испытывают полного внутреннего отражения, а преломляются и вытекают. На выходе волоконного световода излучение также сосредоточено в конусе с половинным углом  $\varphi_c$ .

Оптические потери, или поглощение, обычно выражаются в  $\text{см}^{-1}$ . Однако в стандартных волоконных световодах потери малы и обычно выражаются в дБ/км. При этом справедливо соотношение:  $1 \text{ см}^{-1} = 4,3 \cdot 10^5$  дБ/км. Длина  $L$  отдельных отрезков световода может составлять несколько десятков километров. Волноводные свойства волоконного световода зависят не только от его параметров, но и от длины волны  $\lambda$  распространяющегося излучения. Чтобы учесть этот фактор, вводится нормированная частота  $V = 2\pi a \cdot \frac{NA}{\lambda}$ . Значение нормированной частоты, в частности, определяет модовый состав излучения в световоде. С формальной точки зрения, мода – это устойчивое состояние электромагнитного поля внутри световода, одно из решений уравнений Максвелла для заданной структуры. Условно моду световода можно определить и как траекторию распространения света. Если  $V < 2,4$ , то в световоде распространяется лишь одна мода. Световоды, в которых реализуется такой режим в ближней ИК-области, определяются как *одномодовые*. При  $V > 2,4$  появляются моды более высоких порядков. Число мод при большом значении нормированной частоты порядка  $V^2/2$ . Понятие «одномодовости» носит несколько условный характер, т.к. при уменьшении длины волны излучения одномодовый световод становится многомодовым.[1].

### Классические твердотельные комплексы

Расчёт твердотельных лазеров, проведённый нами, позволяет определить зависимости искомых параметров от выходной мощности, расходимость, лазерного излучения, диаметр луча до фокусировки. Разработанная схема составлена таким образом, чтобы при окончательно

подборе характеристик структуры лазерного комплекса, ею можно было пользоваться в качестве направления выбора правильного пути исследования.

Сущность расчёта, как и в случае волоконных лазеров, состоит в том, что мы отдельно просчитывали ход каждого луча с учётом его преломлений от каждой оптической поверхности. В сущности, отличие твердотельных лазеров от волоконных, с точки зрения нашей работы, заключается в дополнительном влиянии на искомые параметры так называемой «тепловой линзы», которая возникает из-за нагрева кристалла и зависит от мощности накачки [4].

Некоторые из полученных графических зависимостей представлены на рисунках 6-10.

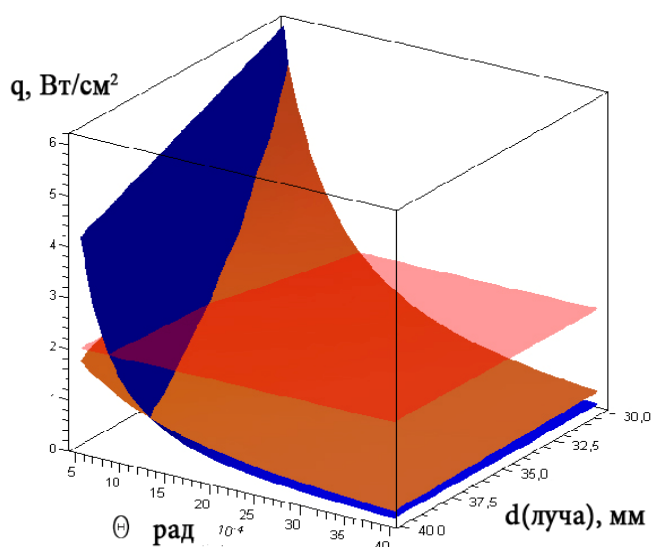


Рис. 6 Пример получаемых расчётных зависимостей: зависимость плотности мощности излучения от расходимости излучения и диаметра луча до фокусирующей системы для различных фокусных расстояний.

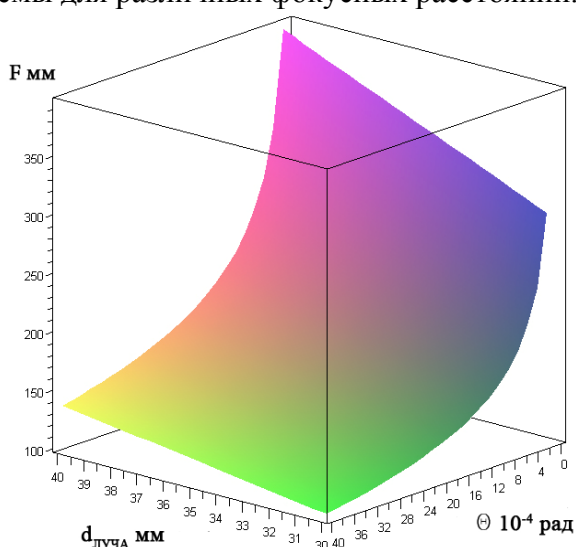


Рис. 7 Зависимость фокусного расстояния от расходимости и диаметра луча

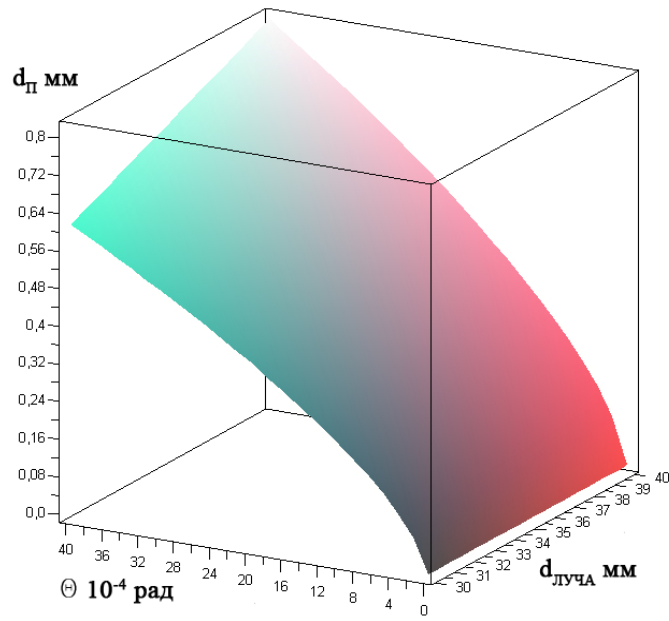


Рис.8 Зависимость диаметра пучка от расходимости и диаметра луча

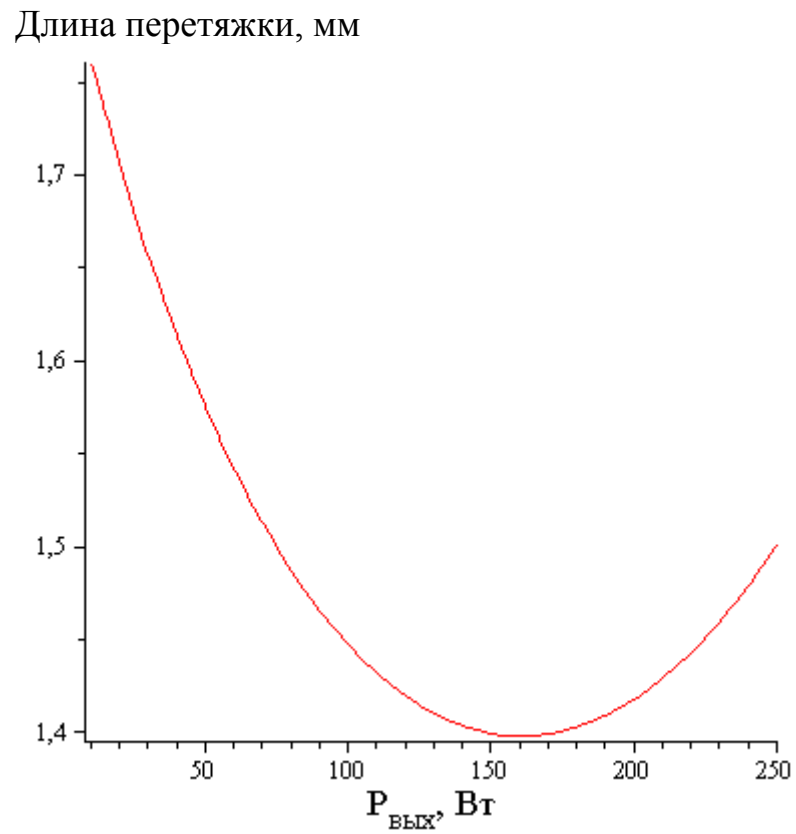


Рис. 9. Зависимость длины перетяжки от требуемой выходной мощности лазера.

### **Литература**

1. *А. Ф. Котюк* «Основы оптической радиометрии» М. Физмалит, 2003, 544 стр.
2. «Наблюдение пассивной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере», ЖТФ 2001 год, том 21, вып. 10.
3. *А. Н. Бочаров, А. В. Мурыгин* «Определение ширины плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при электронно-лучевой сварке», Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, 2005.
4. *Г.М. Зверев Ю.Д Голяев* «Лазеры на алюмоиттриавом гранате с неодимом», -М., Радио и связь, 1985.

УДК 621.375.826

## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СОВМЕЩЁННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Самарин Пётр Евгеньевич<sup>(1)</sup>, Макаров Валерий Викторович<sup>(1)</sup>, Аунг Лин Хтет<sup>(2)</sup>

*Студенты 6 курса<sup>(1)</sup>, магистр 2 года<sup>(2)</sup>,  
Кафедра МТ-12*

*Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э.  
Баумана*

*Научный руководитель: А. И. Мисюров,  
Кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-12*

Применение лазерного излучения для сварки металлов позволяет значительно расширить технологические возможности сварочных процессов, повысить их производительность и улучшить качество сварных соединений. Использование дополнительного теплового источника позволяет повысить эффективность процесса лазерной сварки. Реализация преимуществ достигается при регулировании взаимного положения тепловых источников, имеющих различную распределённость плотности мощности. Изменение взаимного положения тепловых источников позволяет регулировать тепловую обстановку в свариваемом изделии. Высокая сложность процессов создаёт сложности в выборе оптимальных режимов с использованием технологических экспериментов. Поэтому применение методов компьютерного моделирования позволяет упростить выбор оптимальных параметров обработки. В данной работе мы использовали модель, созданную по нашему техническому заданию в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете. В программе присутствует база данных по материалам, в которой содержится информация о физических свойствах различных сталей и сплавов и их химическом составе. Имеет возможность быстрого поиска необходимого материала, редактирования имеющихся данных и добавления новых.

В данной работе исследовали влияние теплофизических свойств и толщины свариваемого металла на эффективность процесса гибридной сварки. Для этого сваривали сталь 30ХГСА ( $\lambda_t = 0,32$  Вт/(см·К)) сталь типа Х18Н9 ( $\lambda_t = 0,163$  Вт/(см·К)) различной толщины: 0,6 и 100 мм.

На первом этапе расчет и проводили для случая сварки стали 30ХГСА толщиной 0,6 мм. Изменяли мощность дополнительного источника тепла и его положение относительно центра лазерного луча при условии полного провара пластины.

Установлено, что полное проплавление лазерным лучом достигается при его мощности 1,3 кВт. За счет использования дополнительного источника тепла можно уменьшить мощность лазерного излучения. Расчет проводили для мощности дополнительного источника 2,4,6 и 8 кВт. Результаты показаны на рисунке 1.

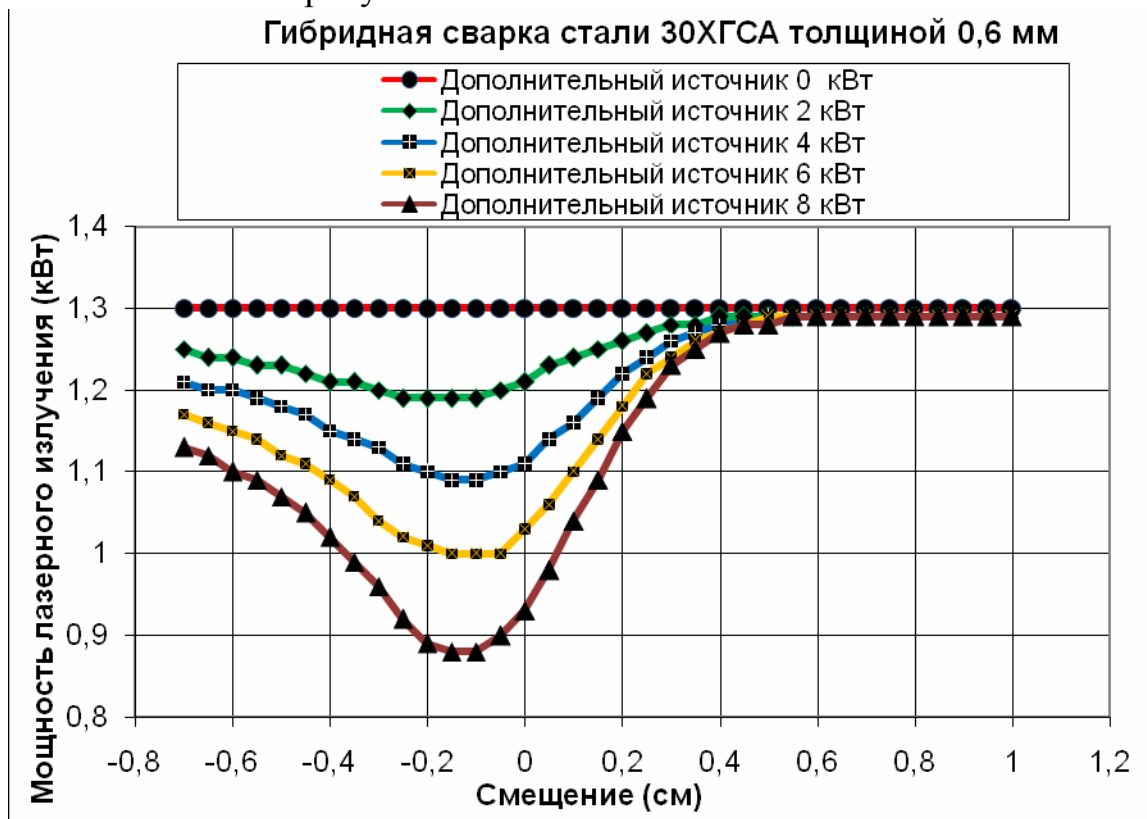


Рис.1. Зависимость мощности лазерного излучения от смещения дополнительного источника при условии полного проплава пластины из стали 30ХГСА.

Изменение положения центра дополнительного источника тепла относительно центра лазерного луча приводит к уменьшению мощности лазерного излучения, необходимой для полного проплавления. Для разных мощностей дополнительного источника максимальное уменьшение мощности лазерного излучения достигается при различных смещениях, однако, имеется тенденция к расположению дополнительного источника спереди от лазерного луча.



**Таблица 1. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь 30ХГСА толщиной 0,6 мм)**

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	1,3
2	1,19
4	1,09
6	1
8	0,88

Таким образом, за счет использования дополнительного источника можно уменьшить мощность лазерного излучения на 32 %.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{1,3 - 0,88}{1,3} = 32\%$$

На втором этапе расчет проводили для случая сварки стали 30ХГСА толщиной 100 мм. Изменяли мощность дополнительного источника тепла и его положение относительно центра лазерного луча при условии полного проплавления пластины. Установлено, что при мощности 6,86 кВт глубина проплавления составляет 0,78 см.

Увеличение мощности дополнительного источника тепла позволяет уменьшать мощность лазерного излучения при сохранении полного проплава.

**Таблица 2. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь 30ХГСА толщиной 100 мм)**

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	6,86
2	6,81
4	6,76
6	6,7
8	6,64

Таким образом, за счет использования дополнительного источника можно уменьшить мощность лазерного излучения на 3,2 %.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{6,86 - 6,64}{6,86} = 3,2\%$$

На основании полученных результатов установлено, что применение дополнительного источника на толщине 0,6 мм позволяет уменьшить мощность лазерного излучения на 32%, а на толщине 100 мм только на 3,2 %.

Таким образом использование дополнительного источника наиболее эффективно при гибридной сварке тонколистовых изделий из стали 30ХГСА.

Далее рассмотрим сварку стали типа Х18Н9, имеющую более низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с 30ХГСА.

Сначала проводили расчёт для толщины 0,6 мм., изменяя мощность дополнительного источника также как и для стали 30ХГСА.

Установлено, что полное проплавление лазерным лучом достигается при его мощности 1,03 кВт. За счет использования дополнительного источника тепла можно уменьшить мощность лазерного излучения. Расчет проводили для мощности дополнительного источника 2,4,6 и 8 кВт. Результаты показаны на рисунке 2.

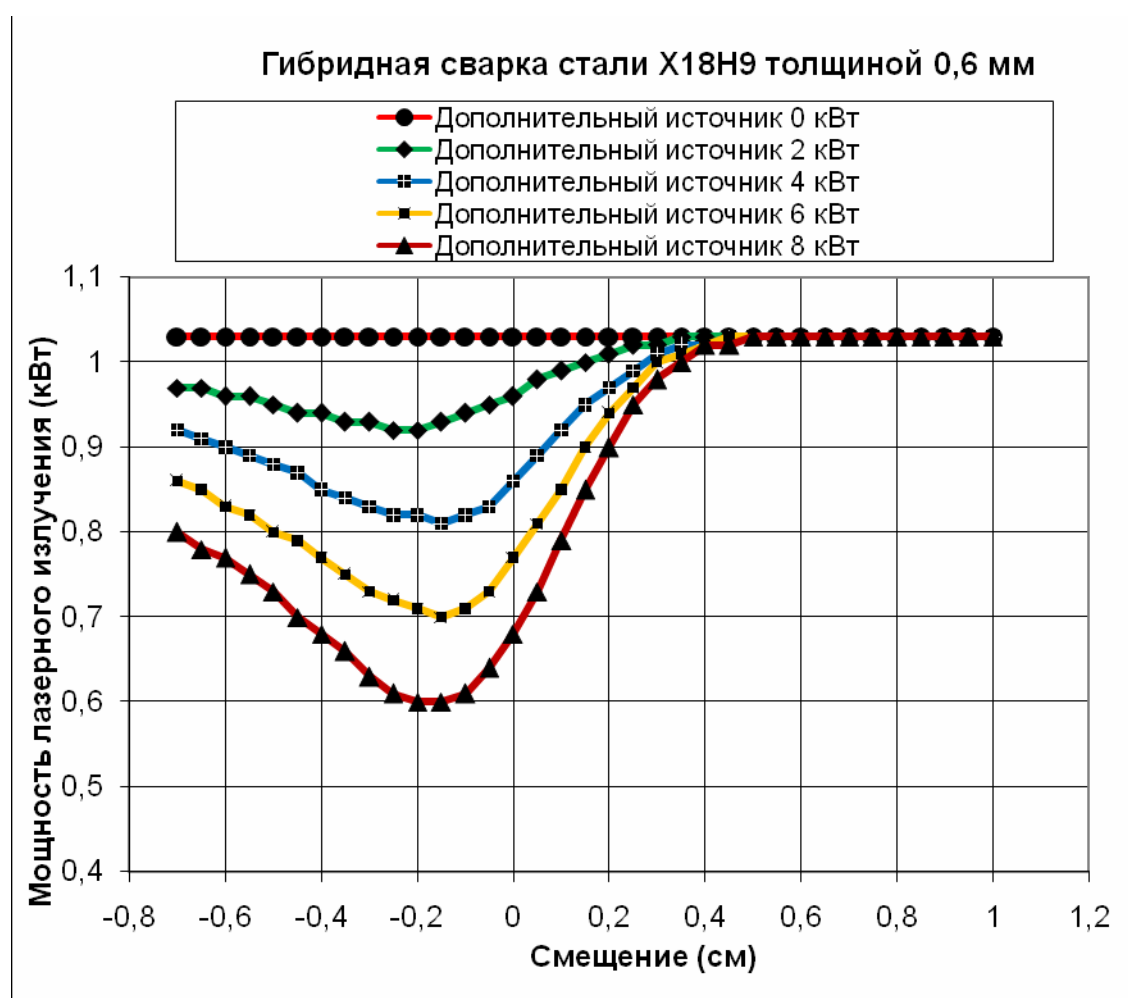


Рис.2. Зависимость мощности лазерного излучения от смещения дополнительного источника при условии полного проплава пластины из стали 30ХГСА.

Изменение положения центра дополнительного источника тепла относительно центра лазерного луча приводит к уменьшению мощности лазерного излучения, необходимой для полного проплавления. Для разных мощностей дополнительного источника максимальное уменьшение

мощности лазерного излучения достигается при различных смещениях, однако, имеется тенденция к расположению дополнительного источника спереди от лазерного луча.

**Таблица 3. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь X18H9, толщиной 0,6 мм)**

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	1,03
2	0,92
4	0,81
6	0,7
8	0,6

Таким образом, за счет использования дополнительного источника можно уменьшить мощность лазерного излучения на 42 %.

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{1,03 - 0,6}{1,03} = 42 \%$$

Рассмотрим теперь сварку стали X18H9 толщиной 100 мм.

Установлено, что при мощности 6,94 кВт глубина проплавления составляет 0,63 см.

Увеличение мощности дополнительного источника тепла позволяет уменьшать мощность лазерного излучения при сохранении полного проплава.

**Таблица 2. Минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления при различных мощностях дополнительного источника (сталь X18H9 толщиной 100 мм)**

Мощность дополнительного источника, кВт	Мощность лазера, кВт
0	6,94
2	6,86
4	6,79
6	6,72
8	6,65

$$\text{Эффективность } \varepsilon = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{max}} - P_{\text{Л}}^{\text{min}}}{P_{\text{Л}}^{\text{max}}} = \frac{6,94 - 6,65}{6,94} = 4,2 \%$$

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что уменьшение теплопроводности приводит к увеличению эффективности на 24 %.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{42 - 32}{42} = 24 \%$$

Наряду с изменением эффективности, при использовании дополнительного источника тепла возможно регулирование тепловой обстановки при сварке. Это особо важно при сварке закаливающих сталей, в которых при лазерном воздействии происходит образование хрупких структур.

При изменении параметров сварочного термического цикла можно добиться благоприятной структуры сварного соединения. Расчёты показывают, что использование дополнительного источника способствует снижению скорости охлаждения  $\omega_{700-800}$  и увеличению времени пребывания при  $t=800-500^{\circ}\text{C}$ . Это должно привести к увеличению пластичности сварного соединения за счёт изменения структуры.

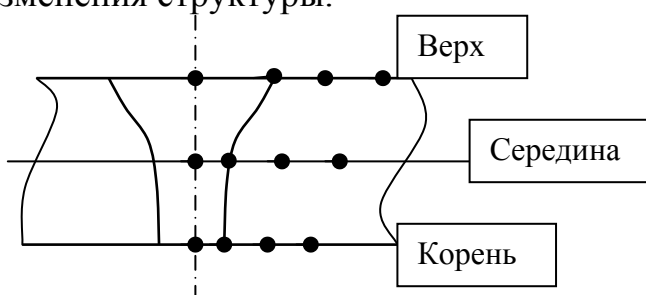


Рис. 3. Точки шва, в которых рассчитывалось время пребывания металла при температурах  $800-500^{\circ}\text{C}$

Расчет проводился в трех сечениях: на верхней кромке, в середине и корне шва (рис. 3) по мере удаления от его центра вплоть до зоны, нагревающейся ниже температуры  $800^{\circ}\text{C}$ .

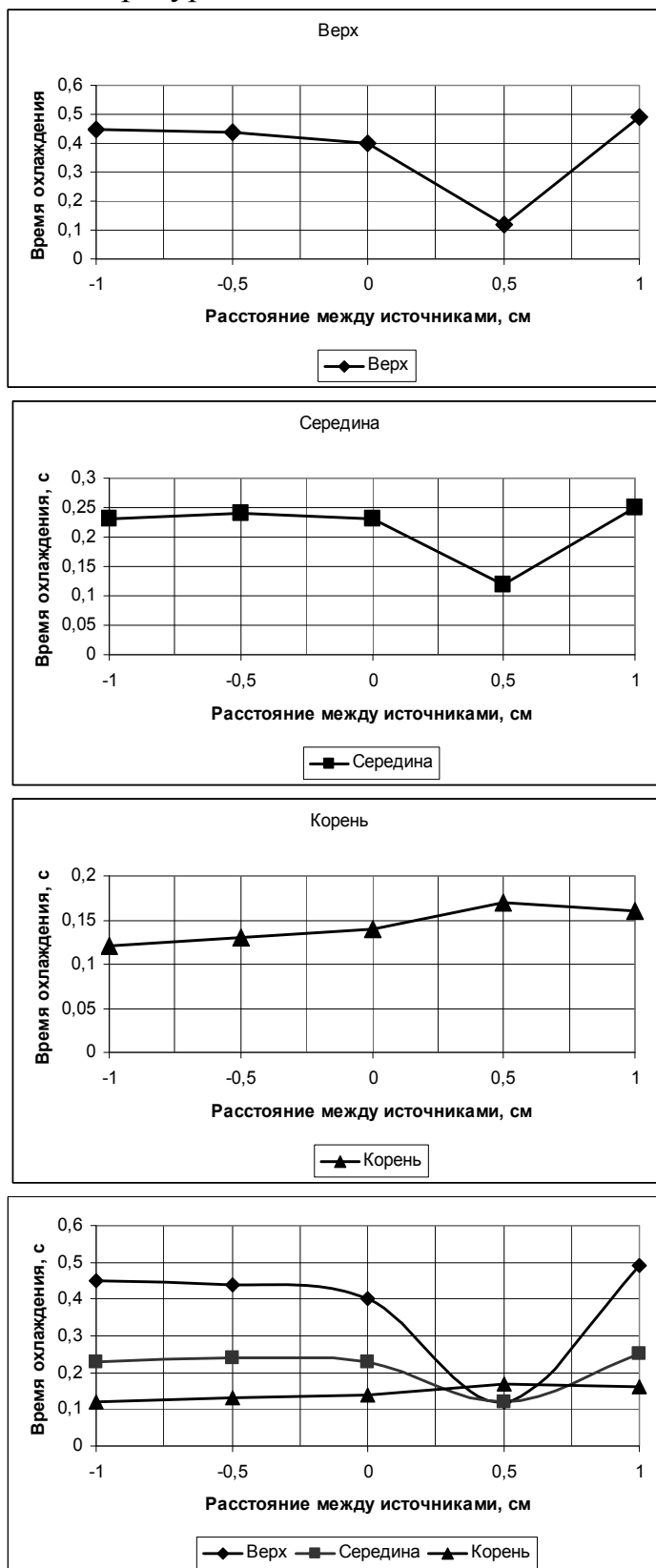


Рис. 4. Зависимость времени охлаждения от расстояния между источниками при сварке совмещенными источниками стали типа 30ХГСА.

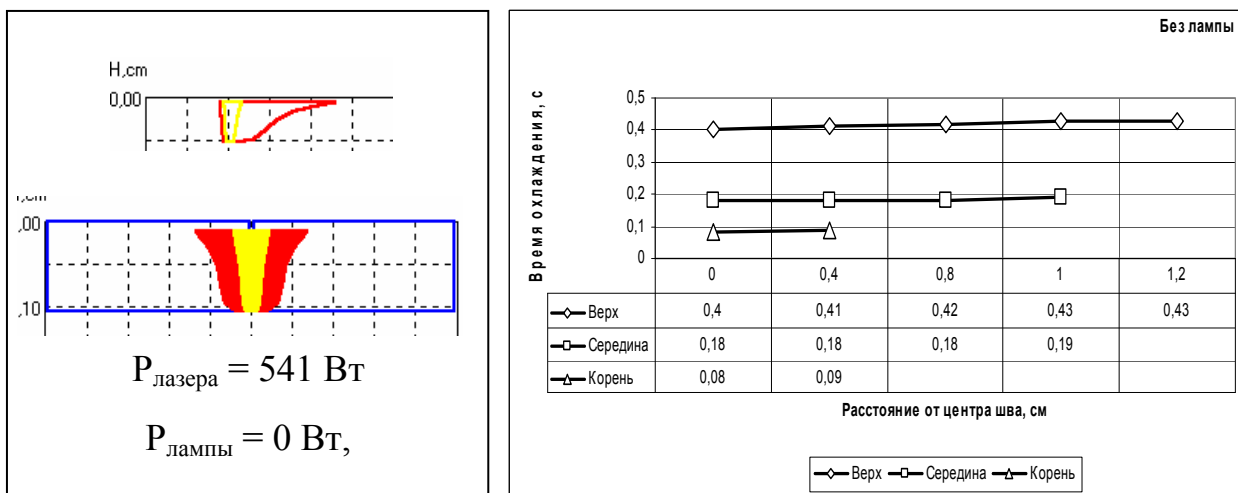


Рис. 5. Форма шва в продольном и поперечном сечениях и скорости охлаждения на верхней кромке, в середине и корне шва для режимов сварки без дополнительного источника.

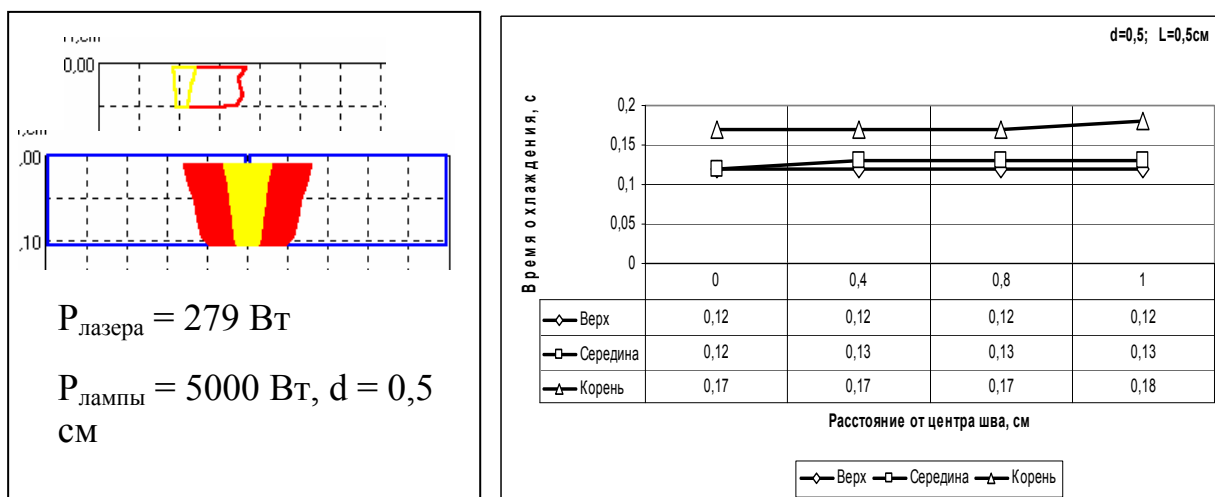


Рис. 6. Максимальный синергетический эффект. Форма шва в продольном и поперечном сечениях и скорости охлаждения на верхней кромке, в середине и корне шва для «характерных» режимов сварки совмещенными источниками.

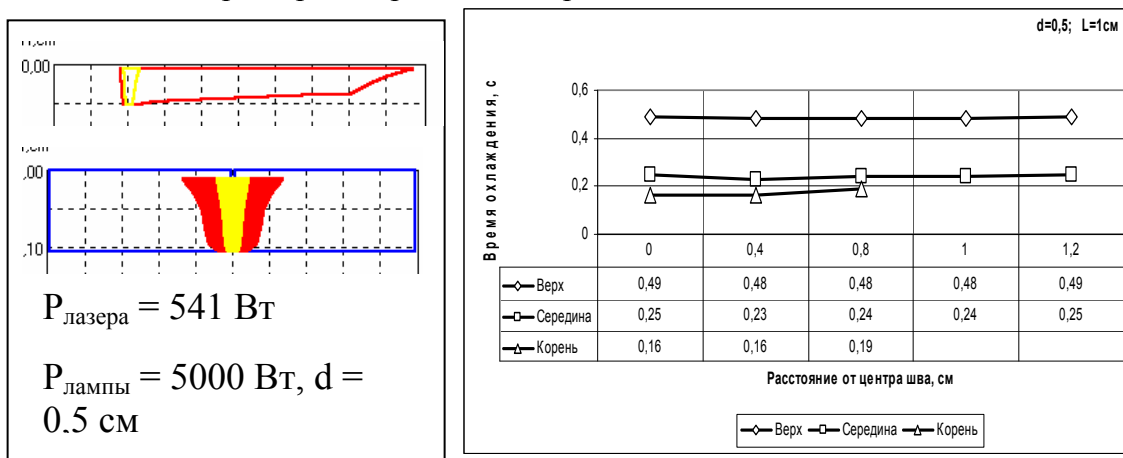


Рис. 7. Минимальная скорость охлаждения. Форма шва в продольном и поперечном сечениях и скорости охлаждения на верхней кромке, в середине и корне шва для «характерных» режимов сварки совмещенными источниками

Анализ расчетных данных показал, что по глубине сварного соединения время пребывания металла при температурах 800-500<sup>0</sup>С, а, следовательно, и скорость охлаждения крайне неравномерны. Наблюдается возрастание скорости охлаждения при переходе от верхней кромки к нижней, корневой части. В условиях полного проплавления пластины при лазерной сварке по сравнению с гибридной, в корневой части сварного соединения время пребывания металла при температурах 800-500<sup>0</sup>С имеет наименьшую величину (рис. 7). Результаты показывают, что за счет введения дополнительного источника можно увеличить это время. Однако на режимах лазерно-световой сварки, при которых наблюдается максимальная эффективность лазерного излучения с точки зрения проплавляющей способности, время пребывания меньше, а значит и скорость охлаждения выше. Это видно из сравнения рисунков рис. 6 и 7. Таким образом, расчеты показывают, что режимы, на которых достигается максимальная эффективность лазерного воздействия, не совпадают с режимами, на которых скорость охлаждения минимальна.

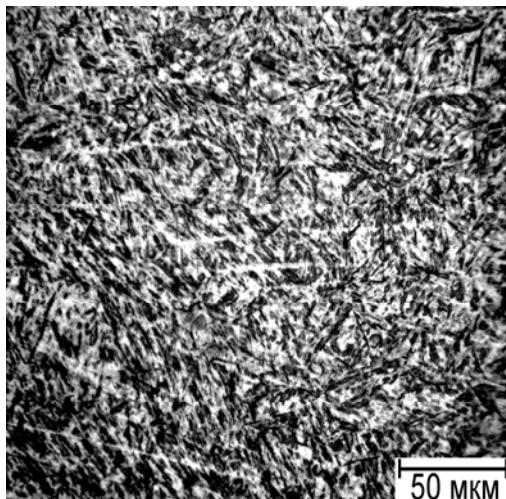


Рис. 8. Мартенситно-бейнитная структура металла шва стали 30ХГСА, возникающая при лазерной сварке.

После проведенного металлографического исследования было установлено, что при лазерной сварке стали 30ХГСА за счет высоких скоростей охлаждения в металле шва образуется крупноигльчатая структура, состоящая в основном из мартенсита (М) и бейнита (Б). Полученные значения микротвердости  $HV_{005}$  650 – 450 соответствуют этим структурам (рис. 8), а процентное соотношение фаз в сварном шве составляет мартенсит - 97% - 95% , бейнит 3% - 5%. Такая структура мало пластична и склонна к трещинообразованию.

При гибридном способе сварки происходит снижение скорости охлаждения и структура шва состоит из троосто-бейнита (рис. 9).

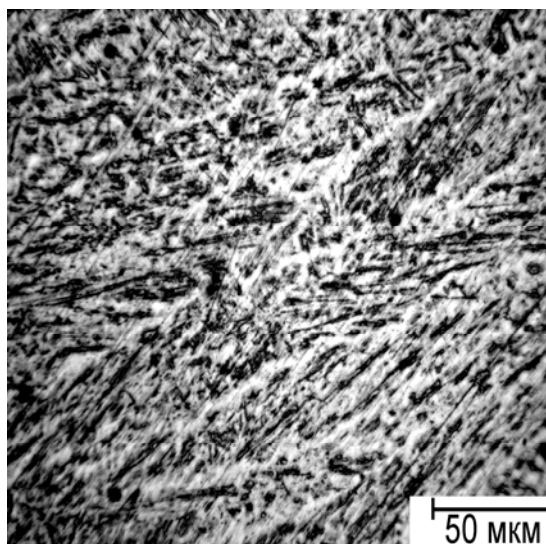


Рис. 9. Бейнитно-трооститная структура металла шва стали 30ХГСА, возникающая при гибридной лазерной сварке.

Микротвердость шва находится в пределах  $HV_{005}$  335-540. Процентное соотношение фаз в шве составляет бейнит 85% - 90%, троостит 10% - 15%. Образование в структуре шва троосто-бейнита приводит к снижению вероятности образования трещин.



УДК 621.791.92

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

Ставертий Антон Яковлевич

*Студент 5 курса (1), кафедра «Лазерные технологии в машиностроении», Московский государственный технический университет.*

*Научный руководитель: Р.С.Третьяков, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении».*

В современном машиностроении становится все более острой проблема повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей машин. В процессе эксплуатации наиболее часто износу подвергаются лишь локальные участки рабочих поверхностей. Поэтому не менее остро стоит проблема восстановления изношенных поверхностей при сохранении всех остальных параметров и характеристик детали неизменными. Таким образом, изыскание и разработка высокопроизводительных методов и технологических процессов упрочнения и восстановления изношенных деталей, исследование их эксплуатационных характеристик является актуальной задачей.

В настоящее время существует большое количество методов упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей машин: термообработка токами высокой частоты [1], различные методы диффузионного насыщения [2], дуговая и плазменная наплавка [3], пайка [4] различные способы напыления: плазменное, газоплазменное, детонационное [5], способы вакуумно-плазменного напыления [6], диффузионная сварка, электроискровое легирование и др.

Одна из заметных тенденций в развитии технологий упрочнения и восстановления поверхностей – уменьшение тепловложения при формировании поверхностного слоя. Это направление выразилось, в частности, в создании технологий напыления. Универсальность технологий напыления, однако, ограничена невозможностью удовлетворить таким эксплуатационным критериям, как адгезионная прочность, когезионная прочность, отсутствие пористости.

Традиционные способы наплавки со значительным перегревом металла и образованием металлургической связи с подложкой (при совместном плавлении и перемешивании) лишены недостатков процессов напыления, однако имеют ряд собственных недостатков, связанных с большим проплавлением основы и разбавлением наплавляемого металла основным. Для сохранения упрочняющей фазы при наплавке необходимо, чтобы температура плавления или разложения упрочняющей фазы превосходила

температуру расплавленного валика. Наплавка без трещин часто возможна только в случае, если глубина проплавления основы будет минимальной.

К числу упрочняющих фаз, мало склонных к разложению при лазерной наплавке, относятся, прежде всего, карбид титана, затем - карбид вольфрама и некоторые другие. Как показывает практика, разложение упрочняющих фаз существенно уменьшается, если процесс вести по схеме газопорошковой лазерной наплавки, когда в зону наплавки совместно с упрочняющими частицами подается пластичный материал. В настоящее время остается неясным, как нужно вести процесс, чтобы уменьшить разложение упрочняющих фаз. Среди карбидов высокой жаростойкостью обладает карбид хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( $T_{\text{пл}} = 2168 \text{ K}$ ), однако он весьма склонен к разложению, и получить композит с высоким его содержанием довольно трудно. Карбид вольфрама обладает еще большей температурой плавления:  $T_{\text{пл}} = 3143 \text{ K}$  и используется в качестве упрочняющей фазы при ударно-абразивной нагрузке.

Известны работы, большей частью зарубежные, в которых технологию лазерного сплавления и впрыск (инжекцию) в оплавленную зону карбидных или других упрочняющих частиц без их расплавления использовали для повышения эксплуатационных свойств. Первая работа по лазерной инъекции была опубликована в 1980 году [7]. Особенно перспективным считается использование технологии инъекции для упрочнения алюминиевых сплавов. В этом случае в пластичную алюминиевую матрицу вводят твердые упрочняющие фазы, например, карбид титана. Такая структура, как показано в работах [8,9,10], обладает повышенной износостойкостью. Сообщается, что коэффициент трения для такой структуры уменьшается в 2 - 2,5 раза.

Исходя из литературных данных, наиболее простой способ получения композиционной структуры - использование мощных лазерных установок ( $\approx 5 \text{ кВт}$ ) и большого диаметра пятна. При малой плотности мощности существенно возрастает общее тепловложение и теряются другие преимущества лазерного луча, кроме того, при больших диаметрах пятна плотность мощности излучения от центра луча к периферии изменяется значительно, что должно влиять на количество нерастворенных карбидов в наплавленном металле. Детально разобраться с тем, как нужно наплавлять карбид, и выяснить общие закономерности формирования композиционной структуры при лазерной порошковой наплавке (для любых фаз) можно только путем глубокого изучения теплофизики процесса плавления и кристаллизации металла и исследования полученных структур в наплавленном металле.

Целью данной работы было получение наплавленного износостойкого композиционного покрытия с помощью излучения волоконного лазера. При подготовке эксперимента было необходимо провести анализ данных по выбору наплавочного материала и исследование распределения мощности лазерного излучения по сечению луча, получаемого на установке. Идея композиционного материала заключается в том, что в

наплавленном слое формируется структура, состоящая из фаз, существенно отличающихся по своим свойствам от материала подложки.

Из литературных источников известно, что одним из лучших показателей износостойкости в высокотемпературной области обладает карбид вольфрама. Это свойство обусловлено плотной и прочной окисной пленкой, появляющейся на его поверхности при высоких температурах. Однако этот карбид склонен к разложению и растворению в жидком металле при лазерной наплавке. Данное обстоятельство осложняет выбор параметров режима и требует поддержания их на заданном уровне.

Так как помимо повышения трибологических свойств требуется также сохранить жаропрочность детали, то в качестве матрицы нашего композиционного покрытия было необходимо брать материал, обеспечивающий жаропрочность и схожий с восстанавливаемой деталью по теплофизическим характеристикам, в особенности, по температурному коэффициенту линейного расширения. С учетом вышеуказанных требований, в качестве наплавочного порошка был принят состав, состоящий из Ni (40%), Cr (10%), WC (50%).

### Описание эксперимента

Технологический комплекс для коаксиальной лазерной наплавки состоял из иттербиевого волоконного лазера ЛС-3.5, системы охлаждения Riedel PC-160, 2-х координатного стола на шаговых двигателях, системы перемещения технологической головки для наплавки (координата Z) и системы подачи наплавляемого порошка (рис.2.1). Также для защиты персонала от отраженного излучения и случайного вмешательства в работу лазерного комплекса предусмотрен защитный кожух.

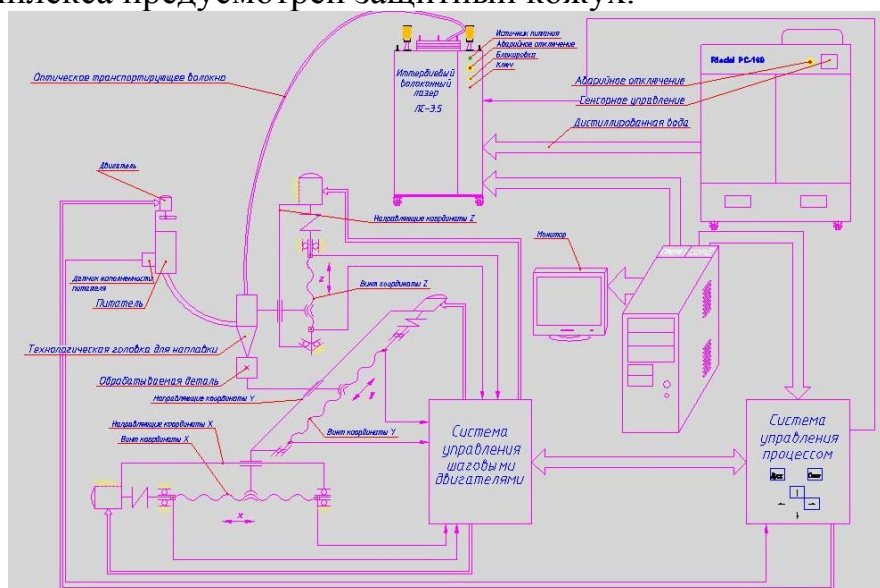


Рис. 1.1 Кинематическая схема комплекса с управлением

Непосредственно функция подачи порошка для коаксиальной наплавки реализуется за счёт питателя. Разработанный питатель реализует схему

подачи порошкового материала в зону обработки под действием гравитационных сил, что позволяет прежде всего обеспечить наибольшую стабильность подачи, особенно при малых расходах наплавочной смеси.

В качестве защитного газа в установке используется аргон, который так же способствует улучшению сыпучести порошка. Аргон поступал непосредственно в бункер с порошком, из которого порошок выходил с

аргоновой смесью, навстречу этой смеси так же идет поток аргона под тем же давлением, что и в бункере, стабилизируя истечение порошка. Так же

аргон поступает непосредственно в сопло, где он выступает в качестве защитного газа, ограничивая ванну от воздействия кислорода.

Технологическая головка для наплавки, разработанная для проведения эксперимента по нанесению композиционного покрытия представляет из себя набор тубусов и имеет крепление для коллимирующей системы фирмы OptoScand и для сопла.

Фокус лазерного излучения располагался выше теоретического фокуса просыпаемого порошка таким образом, чтобы на поверхность падал расфокусированный лазерный луч.

### Исследование распределения плотности мощности

В настоящее время, в связи с недостаточной изученностью оптических свойств световодов, при использовании в технологических волоконных лазерах возникает необходимость измерять распределение энергии в выходном пучке лазерного излучения. По тем или иным причинам распределение энергии по сечению пучка может оказаться неудовлетворительным для проводимого технологического процесса.

Для обработки экспериментально-полученных значений необходимо отметить, что радиально-симметричный пучок лазерного излучения описывается местоположением перетяжки пучка  $Z_0$ , диаметром пучка в перетяжке  $V\sigma_0$ , углом расходимости пучка « $V\sigma$ » в дальней зоне. Перетяжкой пучка измеряется его сечение с минимальными полезными размерами. Качество пучка в процессе его распространения будем характеризовать показателем (коэффициентом) « $K$ » распространения пучка или обратной ему величиной  $\underline{M^2}$ . Величины  $K(M^2)$ ,  $d\sigma_0$  и  $V\sigma$  связывает выражение:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda_0}{\pi} \cdot \frac{1}{n \cdot d\sigma_0 \cdot V\sigma} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{d\sigma_0 \cdot V\sigma},$$

где:  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме;  $\lambda$  - длина волны в среде с « $n$ ».

$$nd\sigma_0 V\sigma = \frac{4\lambda_0}{K\pi} = \frac{M^2 \cdot 4\lambda_0}{\pi}$$

является инвариантом распространения пучка лазерного излучения в безабберационной среде в отсутствии ограничивающих его диафрагм.

Для определения диаметра пучка  $d\sigma(Z)$  было измерено распределение плотности мощности энергии в сечении пучка  $x'$  и  $y'$  с координатой  $Z$  и при

этом учтен азимутальный угол  $\varphi$  между осью «х» пучка и осью «х'» лабораторной системы координат. Измерению подлежал диаметр  $d\sigma_f$  пучка в точке оси, расположенной на расстоянии  $f$  от задней главной плоскости фокусирующего элемента. Угол расходимости лазерного пучка рассчитывается по формуле  $V_\sigma = \frac{d\sigma_f}{f}$ . Для определения К или  $M^2$  необходимо найти диаметр перетяжки  $d\sigma_0$  и углы расходимости  $V_\sigma$ . Для определения координаты «Z» расположения перетяжки пучка учитывались параметры распространения излучения и использовались аппроксимирующие формулы.

Лазерный источник состоит из девяти объединенных модулей. Мощность одного модуля 400 Вт. В ходе эксперимента по измерению распределения плотности мощности использовались модули №1 и №9 на разных мощностях накачки. Изучение распределения энергии излучения по сечению пучка проводилось при помощи метода движущейся щели (Рис. 2.1). Распределение плотности мощности пересчитывалось через долю излучения, проходящего сквозь щель.



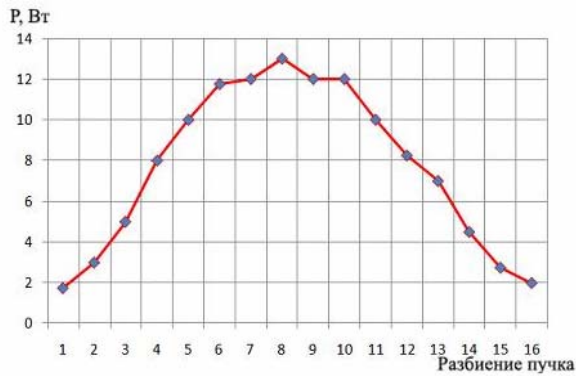
Рис. 2.1. Схема эксперимента. 1 - Движущаяся щель, 2 - Приемная площадка измерителя, 3 - Поперечное сечение пучка, 4 - Предметный столик, 5 – Микрометр.

В качестве измерителя мощности излучения использовался измеритель на базе термоголовки Ophir 5000 W.

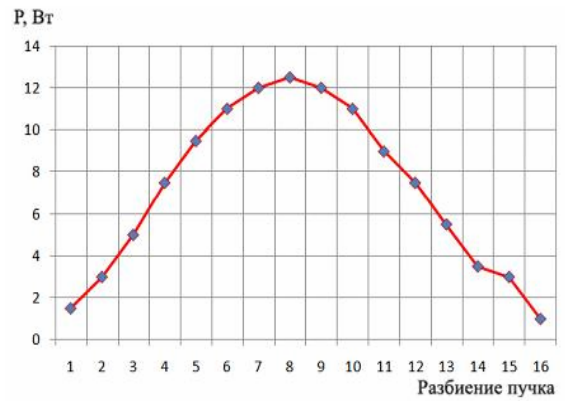
### Распределение мощности излучения по сечению пучка

Измерения показали, что различные модули накачки выдают в общем случае различные распределения плотности мощности излучения, выходящего из транспортного волокна. Это распределение обычно близко по форме к гауссовому (одномодовому). Набор одномодовых излучений создает суммированное излучение, также близкое к одномодовому. Благодаря полученным данным, становится понятно, что из-за низкой концентрации энергии по краям лазерного пучка на края наносимого валика действует

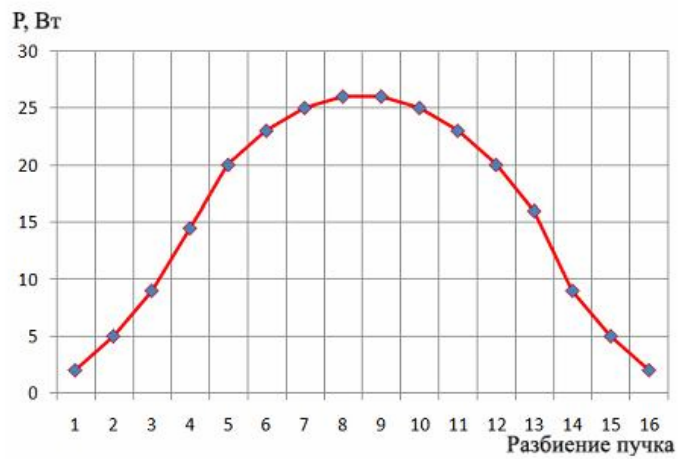
источник энергоснабжения с меньшей плотностью мощности, чем на центральную часть валика (см. рис. 2.2).



а). Модуль №1, ток 30%

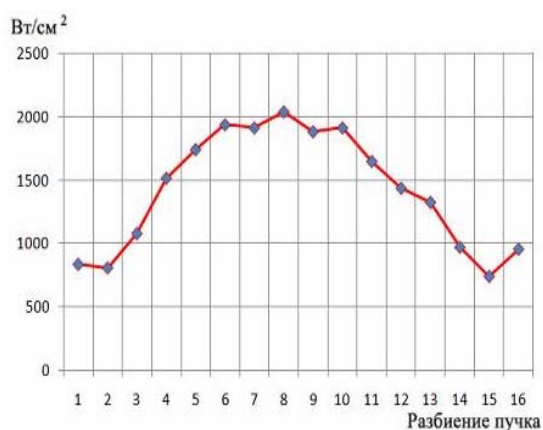


б). Модуль №9, ток 30%

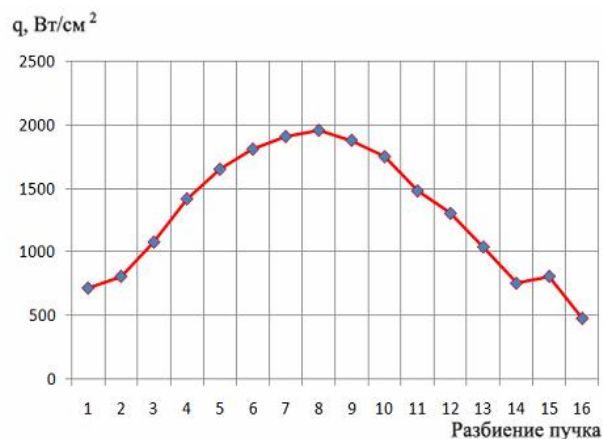


в). Модули №1 и №9, ток 30%

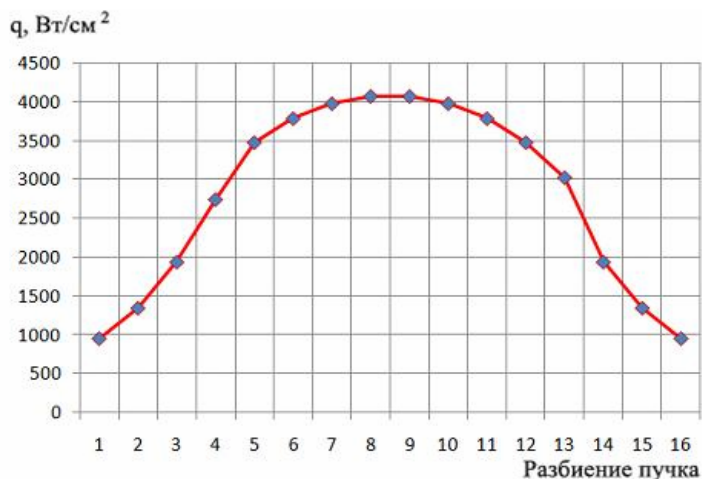
Рис. 2.2. Распределение мощности излучения волоконного лазера



а). Модуль №1, ток 30%



б). Модуль №9, ток 30%



в). Модули №1 и №9, ток 30%

Рис. 2.3. Распределение плотности мощности излучения волоконного лазера.

### Составление и проведение многофакторного эксперимента

При проведении эксперимента планировалось изменять диаметр пятна обработки, мощность лазерного излучения и скорость нанесения покрытия.

Для выбора размера лазерного пучка проведен эксперимент по нанесению валика на режиме:  $P_{cp} = 3000$  Вт,  $V = 2$  м/мин, т.е. на максимальном тепловложении. Диаметр луча составлял 3, 4, 5, 6, 7 и 8 мм. Было отмечено, что оптимальное сочетание формирования валика и минимальная глубина проплавления были получены при размере пятна обработки около 6 мм. После определения оптимального диаметра пятна была поставлена серия экспериментов с варьированием мощности излучения и скорости нанесения покрытия. Режимы, на которых проводились испытания, приведены в таблице 3.1.

**Табл.3.1 Режимы обработки**

№ эксперимента	1а	1б	1в	2а	2б	2в	3а	3б	3в	4а	4б	4в
Мощность, Вт	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2500	2500	2500	3000	3000	3000
Скорость, м/мин	2	3	4	2	4	3	2	3	4	2	3	4

**Изучение формы валиков**

*Режимы первой группы.* При сравнительно малой мощности излучения на всех трех скоростях были получены слишком тонкие валики, поэтому, несмотря на явное наличие карбидов, их исследование не проводилось (рис.3.1-3.3).

Рис. 3.1

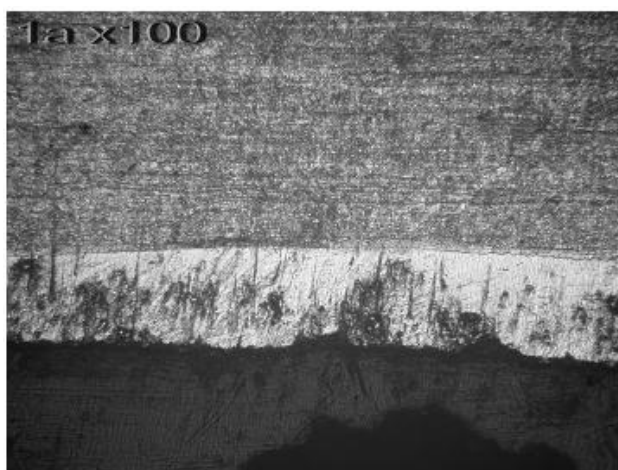


Рис. 3.2

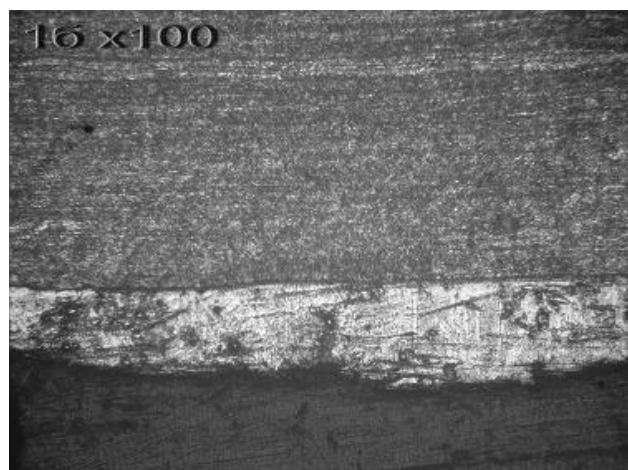
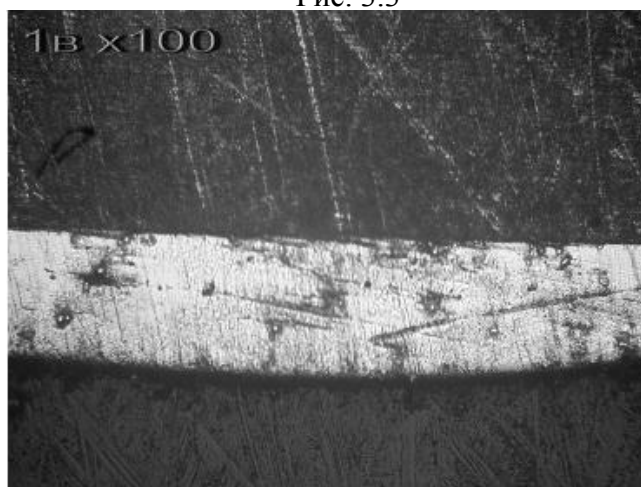


Рис. 3.3



*Режимы второй группы.* Повышение мощности излучения привело к увеличению высоты валика, особенно при небольших скоростях наплавки



(Рис.3.4-3.6). Так же заметно, что при малом объеме расплава в валике остались скопления нерастворенных карбидов вольфрама.

Рис. 3.4.

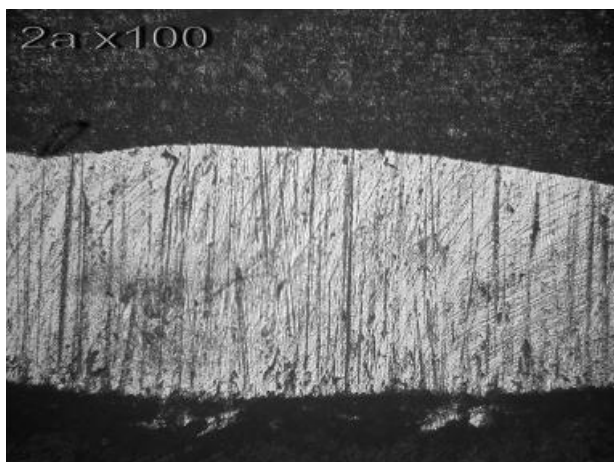


Рис.3.5.

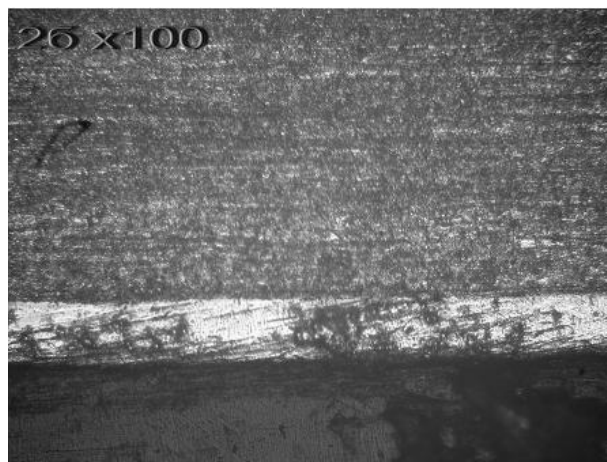
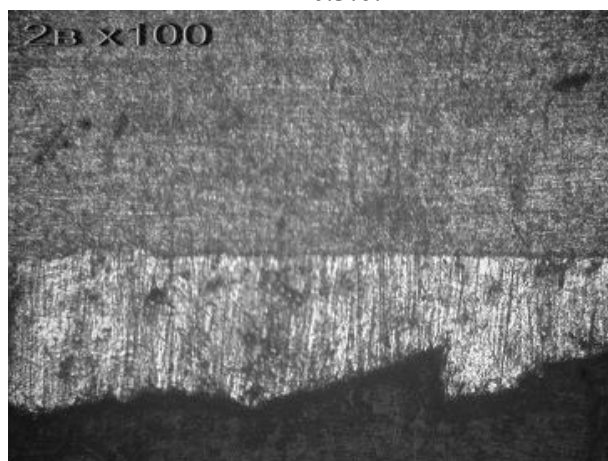


Рис.3.6.



*Режимы третьей группы.* Аналогично предыдущим группам заметно снижение высоты валика в зависимости от скорости наплавки, в общем случае высота валика определяется погонной энергией наплавки (рис.3.7-3.9). При визуальном осмотре приемлемым получился валик режима 3в, его будем исследовать ниже.

Рис. 3.7.

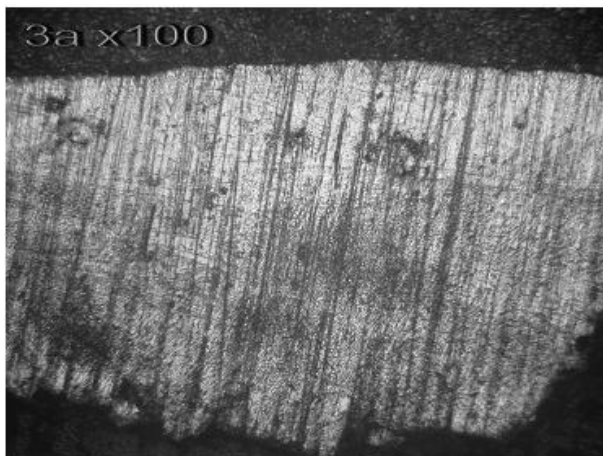


Рис. 3.8.

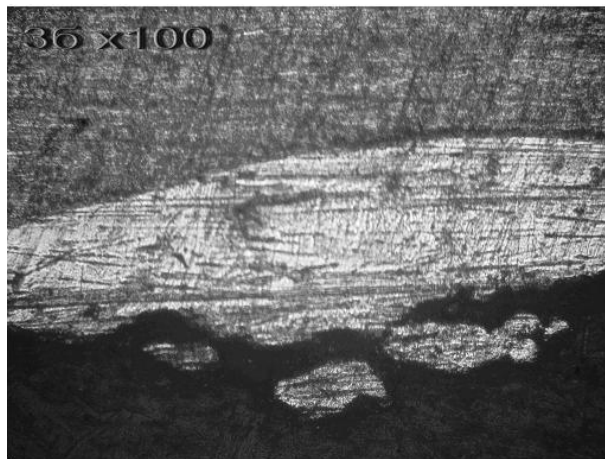
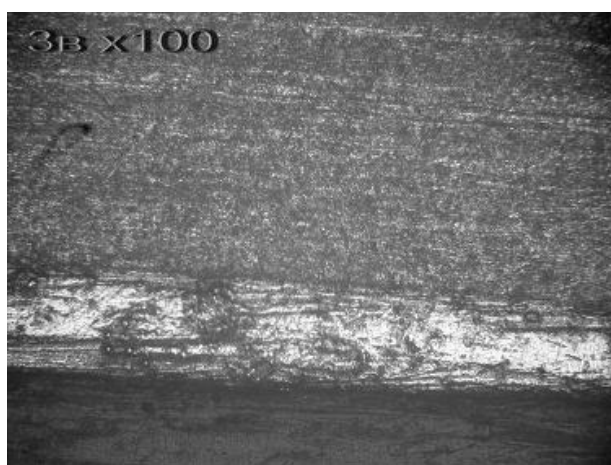


Рис.3.9.



*Режимы четвертой группы.* При максимальной мощности и минимальной скорости получился самый крупный валик (рис.3.10), его необходимо исследовать на наличие нерастворенных карбидов. Кроме того, при максимальной мощности даже в тонких валиках растворилось большинство карбидов, особенно в центре валика, и в наплавленном композите начали появляться поры (рис.3.11, 3.12).

Рис. 3.10

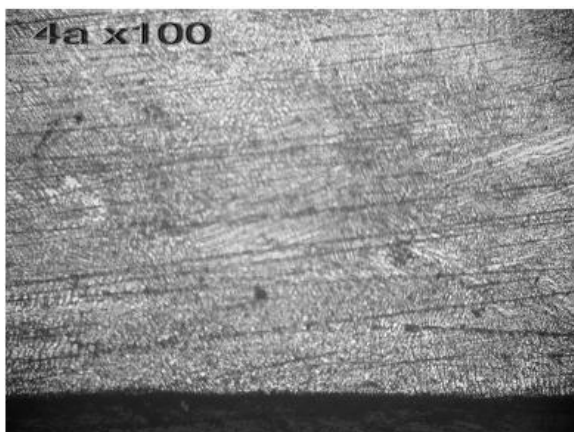


Рис.3.11.

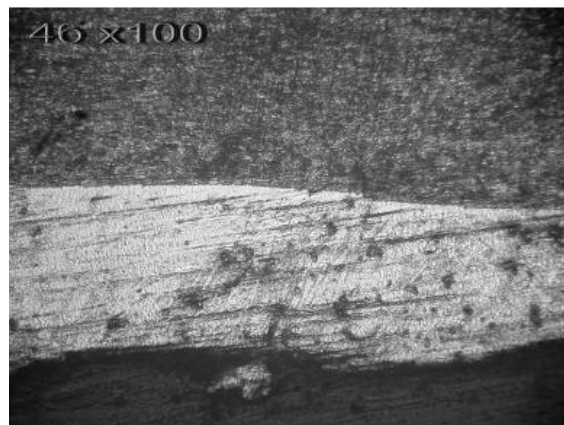
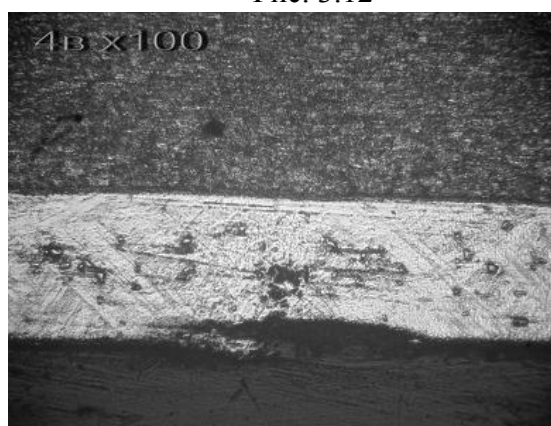


Рис. 3.12

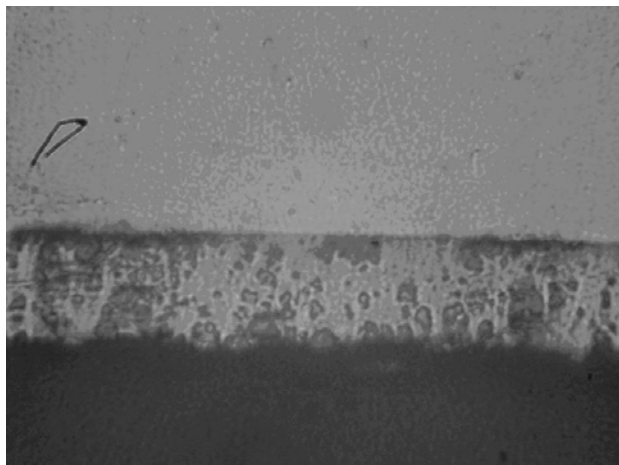


### Изучение микроструктуры

Таким образом, из полученных в результате экспериментов шлифов были отобраны валики с наилучшим формообразованием и наименьшим подплавлением основного материала подложки (детали). При более крупном увеличении (x400) на микроскопе были выявлены образцы, где сохранилось наибольшее количество упрочняющей фазы (WC). Лучшим по предъявляемым требованиям оказался валик, полученный при режиме 3в. А самое большое растворение второй фазы и подплавление основного материала оказалось на образце с самым большим тепловложением, на режиме 4а.

Для того, чтобы убедиться в полученном выводе, была проведена еще одна серия экспериментов на указанных выше режимах. На рис. 3.13 и 3.14 приведены фотографии шлифов на режимах 3в и 4а соответственно, при 100-кратном увеличении. Таким образом, поставленная задача о сохранении упрочняющей фазы была реализована. Следующим этапом исследования проводилась проверка твердости покрытия. Микротвердость наплавленных валиков была замерена с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Рис. 3.13.



3.14

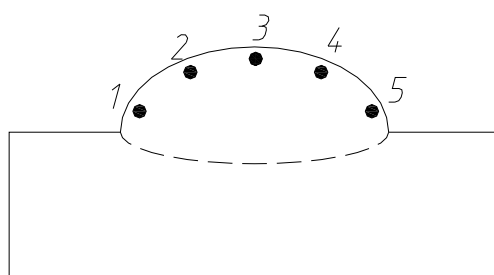


Рис. 3.15 Схема расположения точек измерения микротвердости на нанесенном валике

Измерения микротвердости для двух лучших режимов (приведены в табл.3.1,3.2) свидетельствуют о том, что в зонах с высоким содержанием нерастворенных карбидов микротвердость значительно превышает таковую в основном металле. Неравномерность микротвердости по поверхности валика объясняется тем, что при проведении измерений попадали «пирамидкой» как на сам карбид вольфрама (Рис. 3.17), имеющий микротвердость  $HV_{0,05} \sim 2200$ , так и на мягкую матрицу (Рис. 3.18), у которой микротвердость  $HV_{0,05} \sim 200$ , и на смежную область между WC и матрицей (Рис. 3.19), что дает плавно изменяющуюся твердость, в зависимости от количества растворенных упрочняющих частиц, от  $HV_{0,05} = 380$  до 1500 (табл 3.1, 3.2).

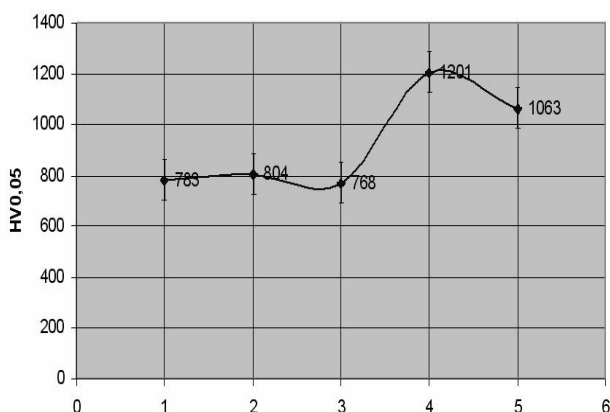


График 3.1 Значения микротвердости при режиме 3в

№ точки	HV0,05			Средняя HV0,05
	713	840	795	
1	713	840	795	783
2	677	795	940	804
3	752	713	840	768
4	795	2130	532	1201
5	840	1410	940	1063

Табл. 3.1 Значения микротвердости при режиме 3в

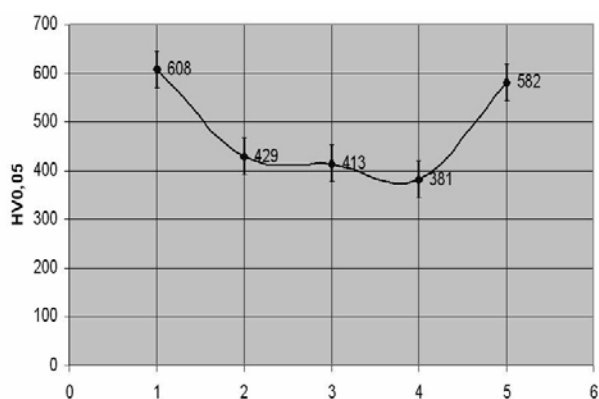


График 3.1 Значения микротвердости при режиме 4а

№ точки	HV0,05			Средняя HV0,05
	532	613	677	
1	532	613	677	608
2	413	462	412	429
3	392	423	424	413
4	358	406	379	381
5	524	541	681	582

Табл. 3.1 Значения микротвердости при режиме 4а

Во время анализа полученных данных, замечено, что на режиме обработки с наибольшим тепловложением, т.е. 4а, по краям нанесенного валика карбиды не успевали раствориться, а по центру валика они полностью растворены (Рис. 3.16). Это видно и по полученным шлифам, и по графику распределения микротвердости. Проведенное исследование распределения плотности мощности по диаметру пятна излучения позволяет объяснить данный факт с позиций различного введения тепла в центральную зону валика и в крайние зоны того же валика.

Как видно из фотографий шлифов, в крайних зонах наплавленного валика количество нерастворенных карбидов существенно выше, чем в центральной области (рис.3.16 - 3.18). Однако их форма неправильная и укрупненная, что может привести к пониженным пластическим свойствам покрытия в зоне сплавления подложки и валика. Полученный валик

представлял собой неоднородный по всей ширине композитный материал, однако при создании покрытия методом многопроходной наплавки карбиды из крайних зон валика должны переплавиться и количество нерастворенных карбидов в нем снизится.

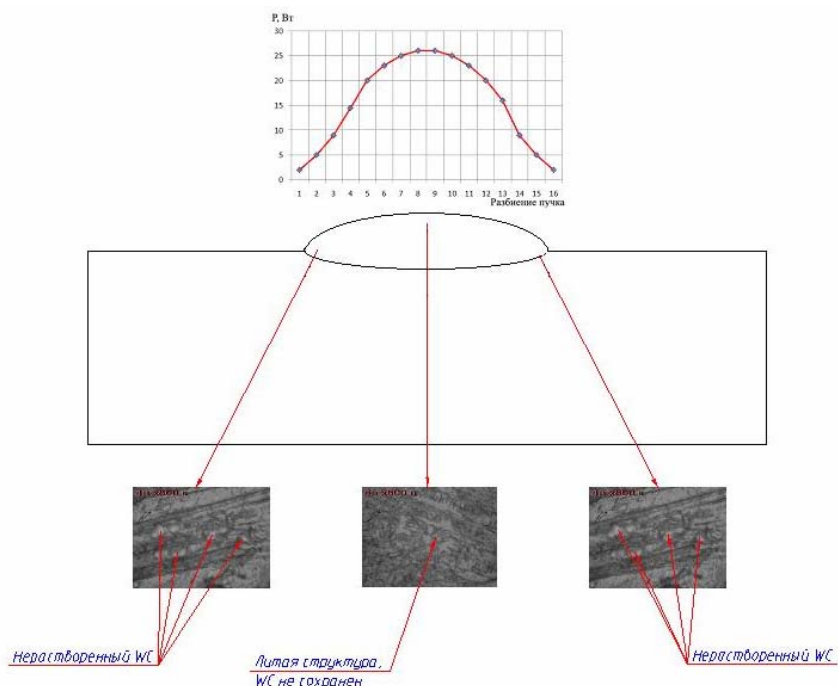


Рис. 3.16 Влияние распределения мощности лазерного пучка на технологический процесс



Рис. 3.17. Измерения микротвердости карбидов

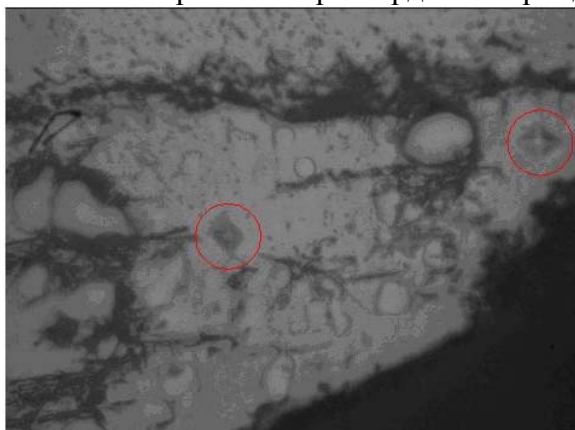


Рис. 3.17.Измерения микротвердости наплавленной матрицы

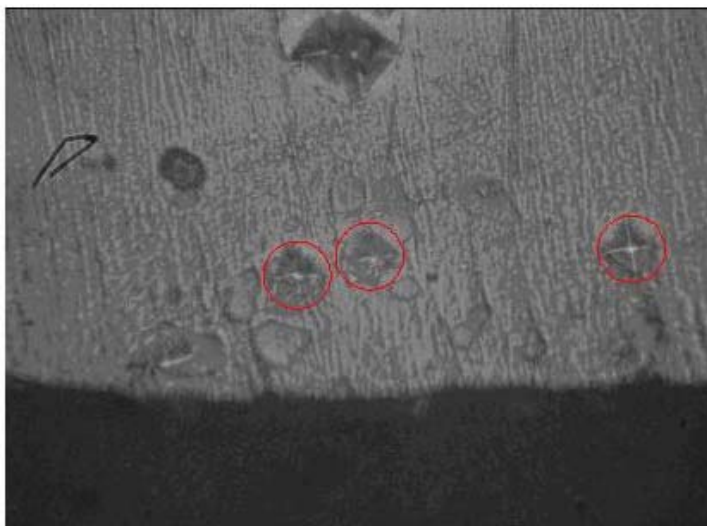


Рис.3.18. Измерения микротвердости растворенных карбидов

### Выводы

В результате экспериментов получено и исследовано композиционное покрытие на основе карбида вольфрама, проявляющее высокие прочностные свойства. Установлено, что:

1. Наплавка мощными непрерывными волоконными лазерами позволяет получать широкие валики без видимых дефектов. При правильном подборе режима наплавки возможно сохранение упрочняющей фазы не только в основании валика, но и по всей ширине наплавленного металла.

2. Распределение мощности излучения не зависит от количества модулей, задействованных для генерации.

3. Распределение плотности мощности излучения по диаметру пятна значительно влияет на структуру и свойства наплавленных валиков.

4. Микротвердость наплавленных валиков изменяется по ширине и существенно зависит от плотности мощности лазерного излучения, воздействовавшей на данный участок валика.

## Литература

1. Новое в термической обработке / Л.А.Петрова, В.А.Прусакова // Новые материалы и технологии термической обработки металлов: Докл. Всесоюзн. конф. - Киев, 1985. - С. 1-5.
2. Коломытцев П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия - М.: Металлургия, 1979. - 271 с.
3. Плазменная наплавка металлов / А.Е.Вайнерман, М.Х.Шоршоров, В.Д.Веселков, В.С.Новосадов - М.: Машиностроение, 1969. - 192 с.
4. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки М.: Машиностроение, 1975. - 231 с.
5. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н.Анциферов, Г.В.Бобров, Л.К.Дружинин и др. М.: Металлургия, 1967. - 792 с.
6. Майсел Л., Гленг Р. Технология тонких пленок. - М.: Сов. радио, 1977. - 664 с.
7. Tucker T.R., Ayers J.D. Metallic coatings modification by scanned electron beam and laser sources// Thin Solid films. – 1980. – v.73. – P. 199-200.
8. Повышение теплостойкости быстрорежущих сталей лазерным легированием / В.А.Бураков, Г.И.Бровер, Н.М.Буракова // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1965. - №11. - С. 2-6.
9. Лазерная обработка спеченных сплавов TiC-сталь / В.К. Нарва, Н.С.Лошкарева, М.Н.Крянина, Е.П.Шуренков // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1987. - №10. - С. 57-59.
10. Электрошлаковая наплавка малого конуса доменной печи композиционным сплавом / С.Я.Шехтер, А.М.Резницкий, Ю.Н.Лазаренко, В.В.Разинский // Автоматическая сварка. - 1978. - №8. - С. 43-47.



**Секция 12**  
**Реновационные технологии**

УДК 621.9.029: 621.771.07

## РЕМОНТ ВАЛКОВ ПРОКАТНОГО СТАНА

Бодарева Анастасия Вячеславовна

*Студентка 5 курса,*

*Кафедра «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении»*

*Московский Государственный Технический Университет*

*Научный руководитель: В.К.Стратьев,*

*Кандидат технических наук, доцент кафедры «Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении»*

Работоспособность деталей машин непосредственно связана с состоянием их поверхностного слоя. При эксплуатации детали взаимодействуют друг с другом или с окружающей средой. Это приводит к изменению геометрических параметров детали, ухудшению эксплуатационных свойств поверхностного слоя и, как следствие, к потере работоспособности детали.

Реновационные технологии, способные восстановить как размеры деталей, так и свойства их поверхностного слоя позволяют значительно сократить себестоимость ремонта узлов и агрегатов, поскольку затраты на восстановление изношенных деталей в большинстве случаев значительно ниже затрат на изготовление новых. Рассмотрим процесс восстановления рабочих валков прокатного стана- комплекса машин и агрегатов, предназначенных для осуществления пластической деформации металла.

Процесс деформации происходит непосредственно в рабочих валках, вращающихся в подшипниках, установленных в рабочих (задающих) клетях, поэтому валки считаются наиболее изнашиваемым элементом прокатного стана.

К качеству валков предъявляют высокие требования т.к вращающиеся валки воспринимают давление, возникающее при обжатии металла, и передают это давление на подшипники. Валки представляют собой ступенчатый вал, имеющие рабочую поверхность - бочку диаметром 140мм. и опорные поверхности – шейки, диаметром 60 мм, на которые устанавливаются подшипники качения.

Практика показывает, что самым изнашиваемым элементом задающей клетки является узел конструкции задающего валка, в частности бочка валка и опорные поверхности – шейки под посадку подшипников, которые так и не вырабатывают свой ресурс за период работы.

Развитие, совершенствование существующих реновационных технологий и создание новых технологических методов восстановления

изношенных деталей машин является актуальной научно-технической задачей.

Под восстановлением понимается комплекс технологических операций, которые возвращают геометрические и физико-механические параметры поверхностного слоя детали и в целом ее работоспособности на уровне ничуть не уступающем новым деталям.

Основными требованиями к методам восстановления деталей машин можно назвать следующие:

восстановленные детали должны обладать исходными или лучшими эксплуатационными свойствами по сравнению с новыми, т.е. при восстановлении желательно использовать упрочняющие технологии;

технологические процессы восстановления должны позволять их автоматизацию и разработку соответствующего оборудования;

процессы восстановления должны обеспечивать минимальные затраты (на материалы, механическую обработку и т.д.), т.е. должны преимущественно использоваться энергосберегающие и безотходные технологии.

В отечественной и мировой практике известны десятки способов восстановления изношенных деталей машин. Учитывая возможные комбинации этих методов между собой и с дополнительными способами упрочнения и размерной обработки, вариации их применения (кинематические схемы, используемые материалы и их состояние, режимные факторы, ноу-хау и т.д.) можно констатировать, что подвидов реновационных технологий, по крайней мере, несколько сотен.

Рассмотрим один из возможных методов восстановления изношенных валков прокатного стана – метод деформирующего резания (ДР).

Метод деформирующего резания основан на подрезании и пластическом деформировании подрезанных слоев с образованием рельефа в виде оребрения. В процессе обработки не образуется стружка. Метод ДР может быть использован при восстановлении размеров деталей как самостоятельный технологический прием. В этом случае увеличение диаметральных или линейных размеров деталей при обработке методом ДР заключается в перераспределении материала поверхностного слоя за счет создания открытой регулярной пористости в виде узких глубоких канавок в поверхностном слое детали при формировании оребрения. Для стальных валов диаметр может быть увеличен до 0,8 мм. Ширина канавок для сталей составляет от 10 мкм до 0,5 мм. Шаг оребрения - от 0,15 до 2 мм, глубина канавок - от 0,2 до 2,0 мм. Канавки могут быть наклонные. В этом случае они будут выполнять роль анкерного замка для покрытия, наносимого на такую поверхность. Производительность, стоимость инструмента и операции практически не отличаются от обычной механической обработки. Например, время получения оребрения на валу диаметром 190 мм, с длиной участка 200 мм составляет около 3 минут.

Нанесение покрытий является наиболее распространенным в промышленности методом восстановления размеров и свойств изношенных деталей машин. Широкое применение покрытий обусловлено их высокой эффективностью, относительно низкой стоимостью и возможностью нанесения различных материалов, в том числе керамических.

Низкая прочность связи покрытия с металлической основой является проблемой при нанесении керамических или металлокерамических материалов, свойства которых имеют значительное отличие от характеристик основы по таким показателям как коэффициент термического расширения, твердость, модуль упругости и др. В то же время именно керамические и металлокерамические покрытия обладают наилучшим комплексом свойств, обеспечивающих высокие эксплуатационные показатели деталей машин.

Очевидно, что макрорельеф, получаемый ДР, который многократно увеличивает площадь поверхности детали после обработки и позволяет реализовать анкерный эффект удержания покрытия, является перспективным для последующих газотермических способов нанесения покрытий. Покрытия, наносимые на оребренную поверхность, могут заполнять межреберный зазор полностью или частично. Оребренная структура с незаполненным межреберным промежутком является демпфирующим слоем между основой детали и формируемым покрытием. Наличие демпфирующего слоя наиболее актуально для сочетания "материал покрытия - материал детали" с резко отличающимися характеристиками, т.е., в первую очередь, для керамических и твердосплавных покрытий на металлических деталях. Частичное заполнение покрытий достигается либо за счет наклонного оребрения, либо установкой сопла, наносящего покрытие, не перпендикулярно напыляемой поверхности, либо соответствующим выбором зернистости напыляемого порошка.

При анализе возможности использования метода ДР в случае нанесения ремонтных составов очевидно, что подготовка поверхности под нанесение ремонтных составов с формированием развитого макрорельефа, также как и для газотермических покрытий, позволит устранить такой недостаток этого метода восстановления, как низкая прочность связи покрытия с основным материалом детали.

Методы химико-термической обработки позволяют существенно повысить эксплуатационные характеристики поверхностного слоя, однако максимальное увеличение размеров для ХТО составляет 0,2 мм (борирование, алитирование). Обычно характерное увеличение размеров составляет 5...50 мкм, что существенно ограничивает использование методов ХТО для восстановления размеров изношенных деталей машин. Комбинация метода ДР и ХТО позволяет не только существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей машин, но и восстанавливать размеры изношенных деталей.

Поверхностная пористость на детали после ДР, в большинстве случаев, является негативным явлением, т.к. уменьшает площадь ее несущей

поверхности, однако для дорогостоящих деталей даже частичное восстановление их служебных свойств может быть экономически целесообразным.

Материал ребер, образованных в процессе ДР значительно упрочнен и имеет твердость и прочность в 1,3...1,7 раза больше по сравнению с твердостью и прочностью основного материала, поэтому можно высказать предположение, что уменьшение несущей способности поверхности восстановленной методом ДР детали будет частично или полностью компенсироваться более высокими механическими характеристиками материала поверхностного слоя.

В некоторых случаях регулярная открытая поверхностная пористость может служить положительным фактором, например, для удержания и подвода смазки, а также для сбора продуктов износа, например, в узлах трения скольжения. Остаточная пористость в виде узких щелевых канавок может служить также объемом для размещения твердых смазок (медь, олово, дисульфид молибдена, фторопласт), так же как порошковых или проволоочных материалов повышенной твердости и износостойкости.

Пористость поверхности после ДР также может играть положительную роль, например, если восстановленная деталь в дальнейшем будет иметь посадку с натягом, то возможность пластического деформирования ребер позволяет в несколько раз увеличить допуск на размер сопрягаемых деталей.

Минимальная величина пористости для ребер, перпендикулярных основанию, составляет около 23%, т.е. несущая способность восстановленной поверхности после полного удаления заострений вершин составит около 77%, что во многих случаях является недопустимым.

Оценка работоспособности проводилась для деталей, восстановленных только с использованием метода ДР, а также для деталей с последующим нанесением покрытий на поверхность, подготовленную методом ДР и для образцов с разным углом наклона профиля.

Эта оценка восстановленных валов (сталь 40Х, твердость 220 НВ) под последующее соединение с натягом производилась путем сравнения усилий запрессовки-выпрессовки восстановленных валов в подшипник 1305 с натягом 20 мкм.

Испытывались варианты с заполнением межреберного зазора ремонтным составом "Belzona-суперметалл", а также оребренная поверхность, полученная методом ДР без заполнения межреберного пространства. Варианты восстановленных по методу ДР поверхностей выполнены на одном валу (рис 1). Окончательный размер всех участков получен на круглошлифовальном станке модели 3А110 с одного установа.

Поверхность №1 сформирована методом ДР с последующим удалением треугольных заострений ребер шлифованием; межреберный зазор ничем не заполнялся.

Поверхность №2 имела оребрение с острыми вершинами ребер и с заполнением межреберного пространства ремонтным составом "Belzona-суперметалл".

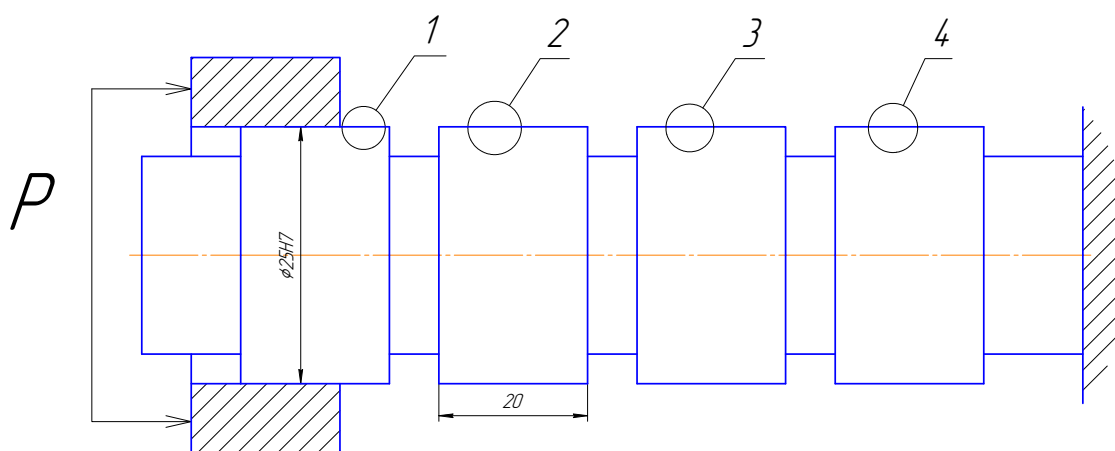


Рис.1 Варианты восстановленных поверхностей.

Поверхность №4 аналогична поверхности №1, но с заполнением межреберного пространства ремонтным составом "Belzona-суперметалл".

Базовым вариантом для сравнения являлся участок гладкого вала (поверхность №3).

Шаг оребрения, равный 0,7 мм, и толщина ребра, составляющая 0,46 мм одинаковы для всех вариантов оребренных структур.

Испытания проводились на токарном станке 16К20. Усилие создавалось задней бабкой станка и прикладывалось по оси вала с упором втулки в кулачки патрона. Измерение усилий производилось образцовым динамометром ДС-3. Запрессовка - выпрессовка производилась десятикратно.

Экспериментальные данные показывают, что при прочих равных условиях усилие, как запрессовки, так и выпрессовки для поверхности №1 (оребренная с сошлифованными вершинами ребер) больше в 1,6...2,3 раза аналогичных усилий запрессовки-выпрессовки по сравнению с базовой (гладкой) поверхностью №3. Усилие запрессовки-выпрессовки втулки по оребренным поверхностям с заполнением межреберного пространства ремонтным составом "Belzona" 1,4...3 раза меньше по сравнению с базовой поверхностью №3.

Выявленный факт значительного повышения усилия запрессовки-выпрессовки при посадке с натягом гладкой втулки по валу по сравнению с оребренной структурой может иметь практическое значение не только для деталей, подлежащих восстановлению, но и для новых деталей, работающих в неразъемных соединениях, воспринимающих осевые нагрузки.

Механизм повышения осевых нагрузок неразъемного соединения, одна из деталей которого имеет макрорельеф в виде оребрения можно объяснить следующим образом. При движении с натягом втулки относительно оребренной поверхности вала, возникающие на вершине ребра силы трения

упруго изгибают ребро. Такой изгиб ребра приводит к его самозаклиниванию, поскольку при упругом повороте ребра увеличивается диаметральный размер вала. Заполнение межреберных зазоров делает невозможным изгибные деформации ребра и приводит к устранению эффекта самозаклинивания ребер. Снижение усилий запрессовки-выпрессовки оребренных поверхностей с заполненным ремонтным составом межреберным пространством можно объяснить антифрикционным свойством ремонтного состава "Belzona-суперметалл".

Незначительное снижение усилий запрессовки-выпрессовки (с 1311 кГ до 1083 кГ) при их десятикратном повторении, а также малая величина уменьшения диаметрального размера после испытаний (на 3 мкм) для участка вала №1 свидетельствует об отсутствии пластических деформаций ребер, т.е. ребра при нагружении работают в области упругих деформаций.

При восстановлении изношенных поверхностей методом ДР с большими величинами износа, или где недопустимо наличие поверхностной пористости, целесообразно применение ремонтных состав.

Оценка прочности сцепления металлополимерного покрытия "Belzona-суперметалл", нанесенного на оребренную поверхность, сформированную ДР, проведена также путем сравнительных испытаний покрытий на сдвиг. Сравнение проводилось с аналогичным покрытием, нанесенным на поверхность, подготовленную по одной из штатных технологий подготовки поверхности (нарезание резьбовых канавок с шагом 1,4 мм и высотой профиля 0,5 мм с последующей пескоструйной обработкой). На предельные сдвигающие усилия были также испытаны оребренные поверхности с заполнением межреберного зазора компаундом "Belzona-суперметалл" и без заполнения.

Участок №1 вала имел оребренную структуру, сформированную методом ДР. Заполнения межреберного зазора не производилось. Шаг оребрения составлял 0,7 мм, ширина канавок составляла 0,24 мм, глубина канавок - 1,42 мм.

Участок №2 имел параметры оребрения, аналогичные участку №1, межреберное пространство заполнялось ремонтным составом "Belzona-суперметалл". Следует отметить, что вершины ребер, находящиеся на поверхности вала, не сошлифовывались и имели размер по диаметру обеспечивающий натяг 0,7 мм. Параметры оребрения такие же, что и для участка №1.

Участок вала №3 являлся базовым и использовался для сравнения. Перед нанесением ремонтного состава "Belzona-суперметалл" на этот участок вала использовалась штатная технология подготовки поверхности, заключающаяся в нарезании резьбовых канавок с шагом 1,4 мм и высотой профиля 0,5 мм. Толщина наносимого покрытия составляла 2,5 мм от верхней части выступов резьбового профиля.

Ремонтный состав на участке №4 наносился на оребрение, полученное методом ДР. Толщина покрытия над вершинами ребер составляла также, - 2,5 мм. Параметры оребрения одинаковы с параметрами оребрения участка №1.

Оценка прочности сцепления покрытия осуществлялась по усилию запрессовки вала во втулку, имеющую меньший на 0,7 мм диаметр, по сравнению с диаметром испытуемых участков вала. Испытания производились на гидравлическом прессе модели П10 с развиваемой нагрузкой до 10 тонн. Регистрация усилия запрессовки производилась по величине давления масла в рабочем гидроцилиндре прессы.

Разрушающее усилие при испытаниях покрытий на сдвиг составило:

поверхность №1 – 1620 кГ,

поверхность №2 – 5100 кГ.

поверхность №3 (базовая) – 1590 кГ,

поверхность №4 – 2100 кГ.

Усилие разрушения покрытия на сдвиг для второй поверхности (оребренная структура с заполненным межреберным пространством ремонтным составом "Belzona-суперметалл") больше в 3,2 раза по сравнению с базовой (поверхность №3). Такие большие воспринимаемые усилия можно объяснить композиционной структурой покрытия, в которой роль армирующих элементов выполняют ребра, при этом ремонтный состав в межреберном зазоре работает не на сдвиг, а только на сжатие. Как отмечалось выше, ремонтные составы имеют предел прочности на сжатие в 5 раз больший, чем на сдвиг. Именно в этом варианте ремонтный состав испытывал только сжимающие усилия.

Восстановленная поверхность №4 с подготовкой методом ДР под нанесение ремонтного состава показала повышение разрушающих покрытие сдвиговых усилий на 30% по сравнению с базовым участком, что свидетельствует о большей прочности сцепления покрытия с поверхностью сформированной ДР, чем с поверхностью, подготовленной по базовой технологии.

Практически одинаковые усилия на срез, полученные на поверхностях №1 и №3, позволяют в случае небольших величин восстанавливаемых размеров, отказаться от применения дорогостоящих ремонтных составов и ограничиться только процессом ДР.

Объединение возможностей метода ДР и высоких эксплуатационных показателей композиционных составов фирмы "Belzona" позволило не только значительно улучшить характеристики восстанавливаемых деталей, но и повысить технологичность и производительность восстановительных работ.

К таким технологическим преимуществам можно отнести следующие: не требуются операции пескоструйной обработки и обезжиривания поверхности, необходимые перед нанесением ремонтных составов, поскольку после процесса ДР практически вся поверхность детали ювенильно чистая;



возможна существенная экономия ремонтного состава и повышение удобства его нанесения за счет надежного базирования наносящего пасту инструмента по вершинам ребер.

Одним из сдерживающих факторов широкого использования газотермических методов нанесения покрытий также является недостаточно высокие показатели прочности и надежности связи покрытия с основным материалом детали. Метод ДР, как средство подготовки поверхности, позволяет получать глубокий регулярный макрорельеф в виде ребер с возможностью регулирования их высоты, шага или наклона.

Сравнительные испытания восстановленной поверхности на срез были проведены для плазменнонапыленного металлического (латунь Л63) покрытия, нанесенного на поверхность после обработки ДР. Сравнение производилось с поверхностью, подготовленной методом нарезания резьбы треугольного профиля. Рельеф, полученный ДР, кардинально меняет картину механизма отслоения напыляемого материала от основы. При предельных сдвиговых нагрузках в случае подготовки поверхности в виде треугольной резьбы зафиксировано полное отслоение покрытия от поверхности детали. Прочность на сдвиг в этом случае составила 19 МПа. В случае подготовки поверхности методом ДР отслоения не происходит (прочность на сдвиг составила 23 МПа), покрытие не отслаивается, а разрушается по своей толщине. В данном случае фактором, определяющим прочность связи покрытия с основой, является не адгезионное взаимодействие, а механические характеристики самого покрытия. Канавки, полученные методом ДР, обеспечивают не только повышенную адгезионную, но и механическую связь покрытия с материалом основы за счет анкерного эффекта.

Проведена оценка повышения прочности сцепления при термоударных нагрузках плазменнонапыленного керамического покрытия ( $Al_2O_3$ ), нанесенного на поверхность стального вала, подготовленного под напыление методом ДР. Оребрение формировалось на цилиндрических образцах диаметром 25 мм длиной 150 мм из стали 40Х. Оптимизация геометрии оребрения производилась в два этапа. Критерием оптимизации являлось наибольшее количество выдержанных термоциклов до отслоения, либо появления визуально наблюдаемых трещин керамического покрытия при резком охлаждении вала с покрытием (погружение в воду) после нагрева до 1223 К. На первом этапе проводился предварительный анализ геометрии оребрения в диапазоне шагов 0,2...1,1 мм с высотой профиля от 0,3 до 2,0 мм. Количество типоразмеров оребрения на первом этапе испытаний составило 15 вариантов. Толщина плазменнонапыленного покрытия составляла 0,6 мм. Покрытие наносилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д. Максимальный размер частиц напыляемого материала составлял 100 мкм.

По результатам испытаний на термоудар по первому этапу выбран диапазон типоразмеров оребрения для второго этапа оптимизации с шагами от 0,25 до 0,5 мм и высотой профиля от 0,11 до 0,75 мм.

Наибольшее количество термоциклов показала поверхность, подготовленная методом ДР с параметрами: шаг - 0,25 мм, глубина профиля оребрения - 0,38 мм, ширина канавки 0,09 мм. Покрытие на поверхности образца, подготовленного пескоструйной обработкой и черновым точением, выдержало не более 1...3 циклов нагрев-охлаждение, в то время как покрытие на поверхности, подготовленной методом ДР, выдержало 28 циклов.

Таким образом, метод ДР существенно повышает эксплуатационные характеристики получаемых покрытий и является перспективным также при подготовке поверхностей под плазменное напыление покрытий. Оценка работоспособности образцов с наклонным углом профиля (сталь 40Х, твердость 220 НВ) под последующее соединение с натягом производилась путем сравнения усилий запрессовки-выпрессовки образцов в подшипник 1305 с натягом 20 мкм.

Из анализа результатов опыта видно, что прослеживается тенденция увеличения силы распрессовки по отношению к величине силы запрессовки и тенденция к уменьшению сил запрессовки – распрессовки с увеличением угла наклона профиля ребра.

Для обработки данных эксперимента по нанесению ремонтного состава был выполнен дробнофакторный эксперимент ДФЭ 24-1, был определен полином, четыре фактора, влияющих на процесс ДР.

**Таблица 1. Сравнительная характеристика режимов резания**

Материал	Сталь 45	Сталь 45
t, глубина	-1.5 ... -0.1	-1.5 ... -0.1
угол	39	42
S, шаг	0.5	0.5
Скорость V м/мин	0.6...1.2	0.6...1.2

Результатом эксперимента является значение диаметра полученного при оребрении. После окончательного подсчета всех коэффициентов уравнения регрессии и анализа данных можно заключить, что найден оптимальный режим деформирующего резания табл.1. По результатам проведенного дробнофакторного эксперимента можно сделать вывод, что наилучшим режимом для проведения процесса ДР будет режим со следующими значениями факторов: глубина  $x_1 = 1,1$  мм, угол наклона  $x_2 = 5$ , шаг оребрения  $x_3 = 2$  мм, скорость  $x_4 = 0,9$  м/мин.

Как уже указывалось ранее, ДР осуществляется на обычном токарном станке, в отличии от других способов восстановления, зачастую для них требуется дорогое оборудование или материалы.

Однако, фактором, существенно ограничивающим область использования ДР, является ограничение по твердости перед обработкой методом ДР. Твердость обрабатываемого материала должна быть не выше 240 НВ.

Для закаленных деталей, как в нашем случае, это накладывает требование обязательного проведения поверхностного или объемного разупрочнения (отжига) изношенной детали перед нанесением оребрения. Это обусловлено необходимостью повышения пластичности предварительно закаленных поверхностей таких деталей, что в свою очередь ведет к повышению себестоимости восстанавливаемой детали. Так как термообработка, особенно объемная, может привести к короблению и образованию дополнительных усталостных напряжений в детали.

### Основные выводы

#### I. Метод ДР:

это самостоятельный технологический прием, позволяющий восстанавливать размеры изношенных деталей машин до 1,2 мм на диаметр;

средство подготовки поверхности под последующую ХТО, или электроискровое легирование, поскольку после обработки методом ДР размеры детали увеличиваются значительно больше чем при этих видах обработки;

средство подготовки поверхности под нанесение газотермических покрытий, ремонтных составов или последующего эмалирования, поскольку развитый макрорельеф, полученный методом ДР, позволяет увеличить прочность сцепления материала покрытия с основным материалом детали;

средство подготовки поверхности под приваривание ленты, поскольку оребренная поверхность при этом обеспечивает большие температуры и давления в зоне контакта, чем гладкая поверхность и, как следствие, большую прочность связи ленты с основой.

В ходе экспериментов была разработана методика выбора углов инструмента в плане и режимов ДР для заданного увеличения линейных размеров восстанавливаемых деталей.

II. Выявлен эффект самозаклинивания оребренной методом ДР поверхности в сопрягаемых с натягом парах, который сопровождается увеличением усилия запрессовки-выпрессовки таких пар в 1,6...2,3 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

III. Испытания покрытия на основе ремонтного состава "Belzona-суперметалл" на срез показали увеличение воспринимаемых покрытием сдвиговых нагрузок в 3,2 раза в случае подготовки поверхности методом ДР по сравнению с аналогичным покрытием, наносимым на поверхность, подготовленную по штатной технологии.

IV. Изменение угла наклона профиля ребра (90, 30, 60, 90, 120) выявляет тенденцию к уменьшению сил запрессовки-выпрессовки с увеличением угла наклона профиля.

## Литература

1. *Н.Н. Зубков, И.Г. Кременский, С.Г. Васильев.* Восстановление изношенных поверхностей с использованием металлорежущего оборудования. М.: Машиностроение, 2001. – 415 с.;
2. *Кудинов В.В.* Плазменные покрытия.– М.: Металлургия, 1977.– 184 с.;
3. «Восстановление исходных размеров и подготовка поверхностей под нанесение покрытий методом деформирующего резания» // Метро. – 1998г.
4. *П.Ф. Дунаев О.П. Леликов.* Учебник «Детали машин».

