

УДК 621.777

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ТРУДНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ШТАМПОВКИ (КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ВЫСАДКИ С ПРЯМЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ)

Бондаренко Александр Константинович⁽¹⁾, Артёмов Фёдор Евгеньевич⁽²⁾,
Жанзаков Павел Кабдукалиевич⁽³⁾

Инженер-технолог⁽¹⁾, Инженер-технолог⁽²⁾, Инженер-технолог Зк⁽³⁾

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°C.

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, %											
C	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 $T_{исп.}=20^{\circ}\text{C}$

$\sigma_{в},$ МПа	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\delta_5,$ %	$\psi,$ %	Е, ГПа
740-880	295-390	45-60	52-60	200

Плотность – 8350 кг/м³, 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 ε_p ". Под показателем напряженного состояния понимаем отношение среднего напряжения σ к интенсивности напряжений σ_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)

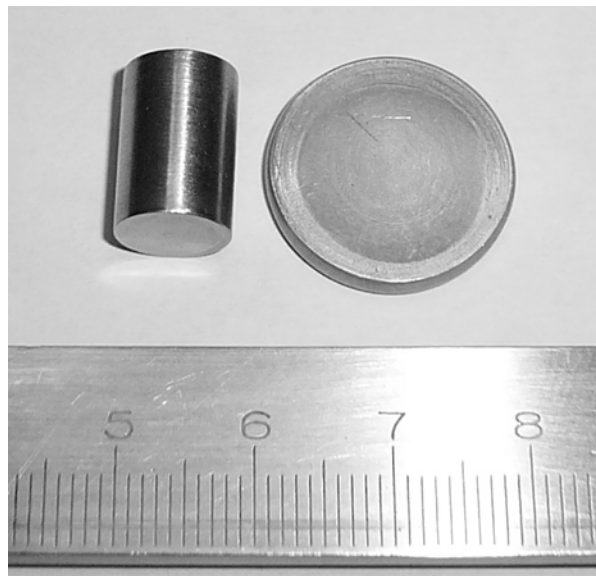


Рис.1 Образцы до и после осадки

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 пресса 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)

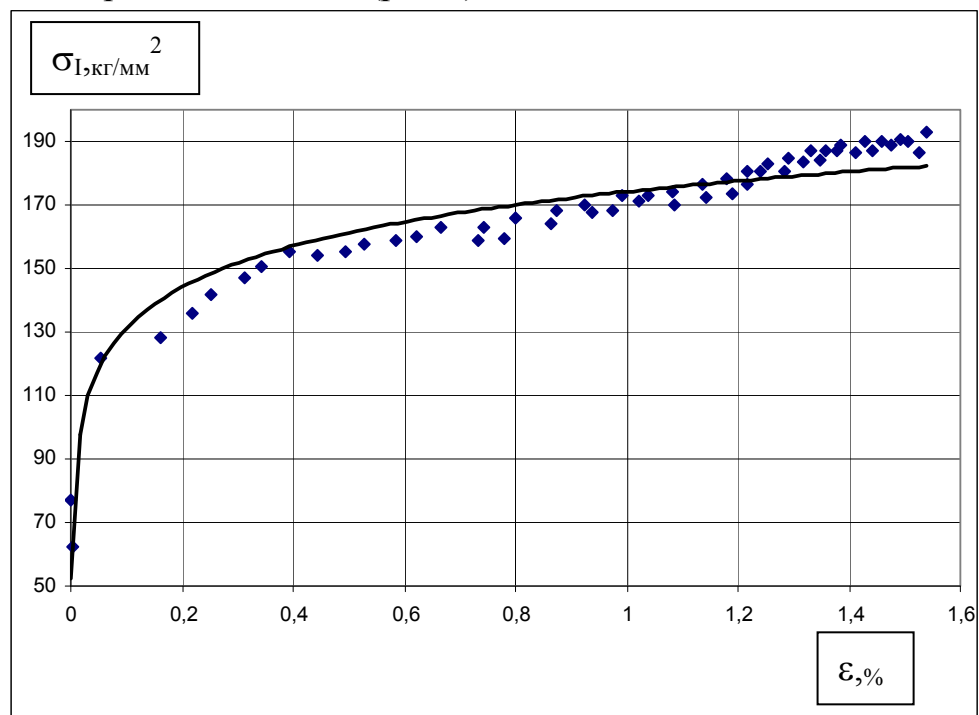


Рис.3 Кривая упрочнения сплава ХН60ВТ, построенная по результатам испытаний на сжатие

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).

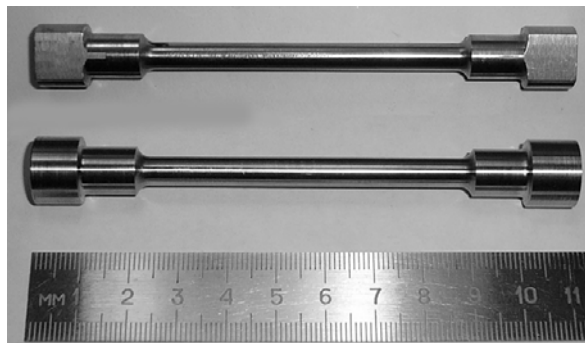


Рис.4 Образцы для испытаний на растяжение и кручение

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 замерялись 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 перекосящий цилиндрической части образца. Кручение образцов осуществляли на машине марки КМ50-1, имеющей максимальный крутящий момент 5 МН, регистрируя угол поворота φ 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 φ_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)

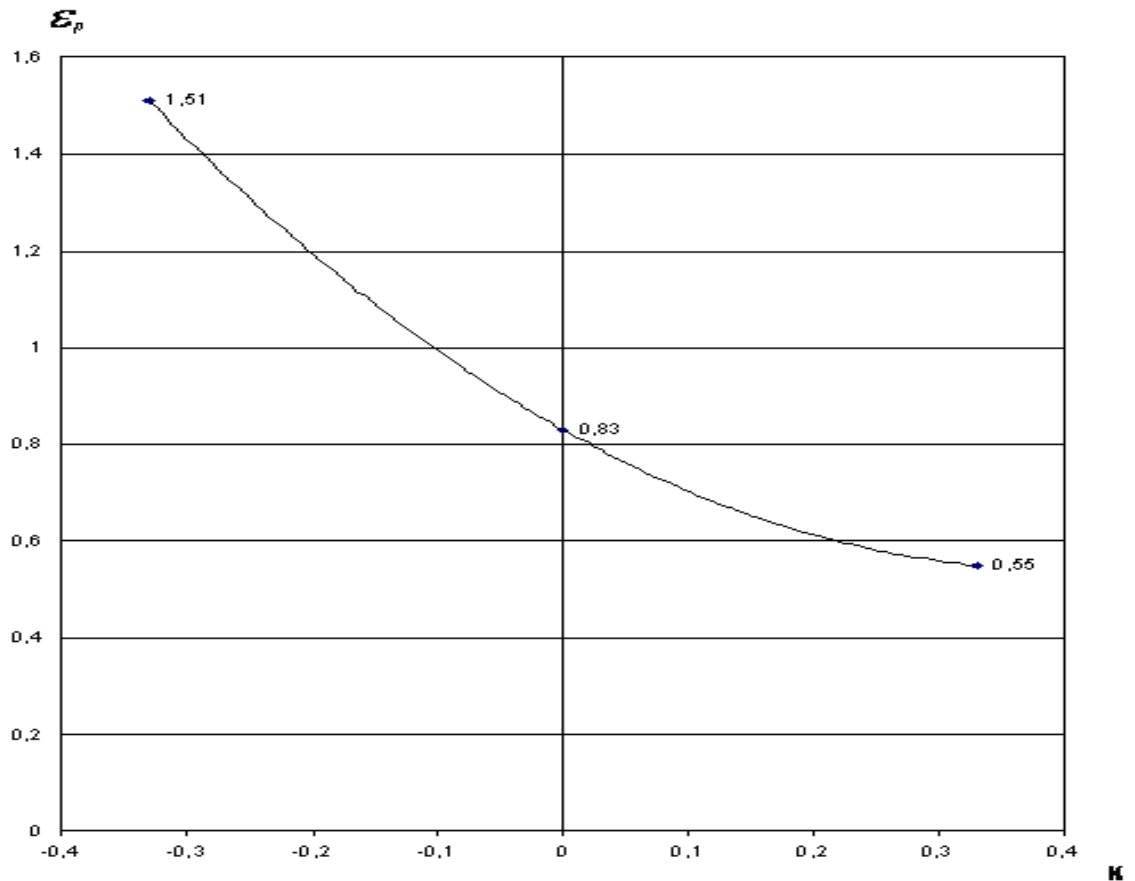


Рис. 5 Диаграмма пластичности никелевого сплава

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).

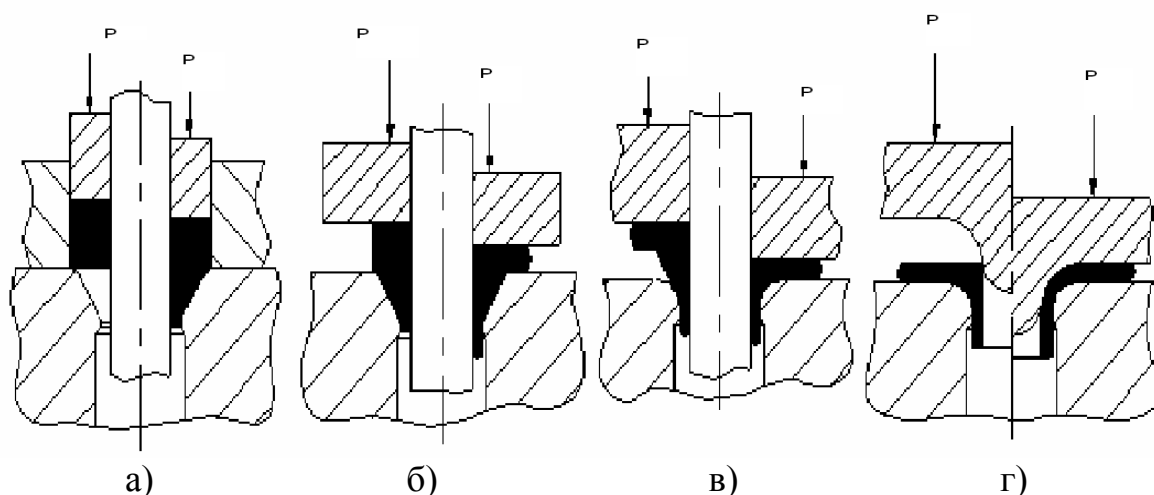


Рис. 6. Схемы технологических операций штамповки полых заготовок с широким фланцем со сквозным отверстием из цилиндрической заготовки с отверстием: а) прямое закрытое выдавливание; б) комбинированный процесс выдавливания с высадкой; в) комбинированный процесс выдавливания с высадкой; г) калибровка.

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.

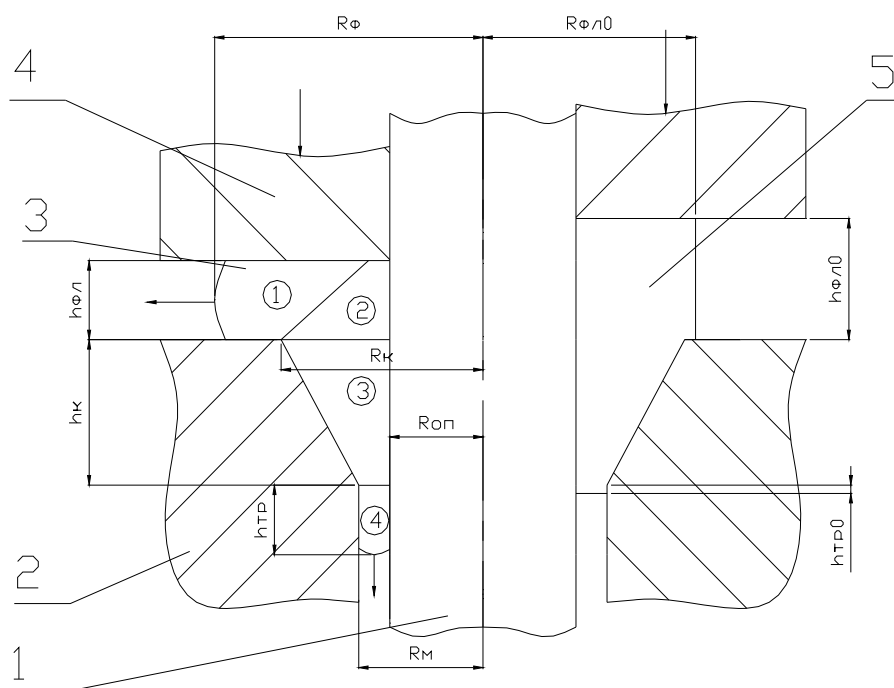


Рис. 7. Схема комбинированного процесса высадки с прямым выдавливанием: 1 – оправка; 2 – матрица; 3 – получаемая деталь; 4 – пуансон; 5 – исходная заготовка.

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.

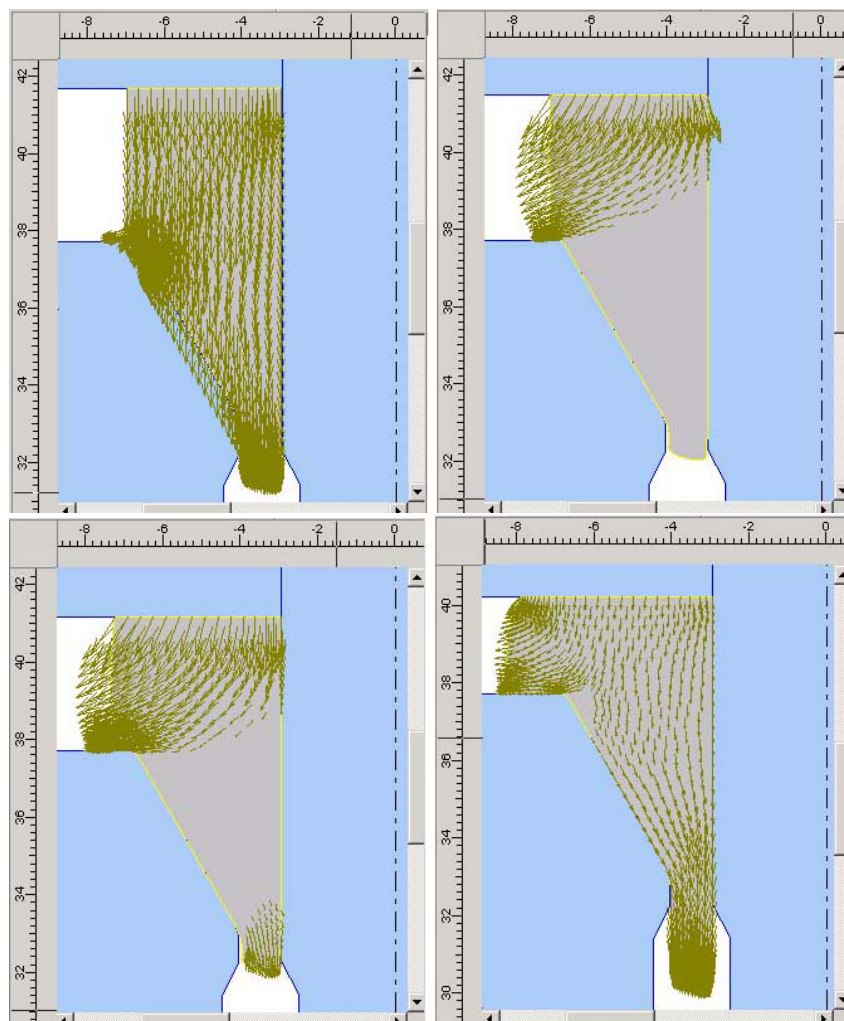


Рис. 8. Поэтапное распределение векторного поля скоростей при комбинированном процессе прямого выдавливания с высадкой

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.

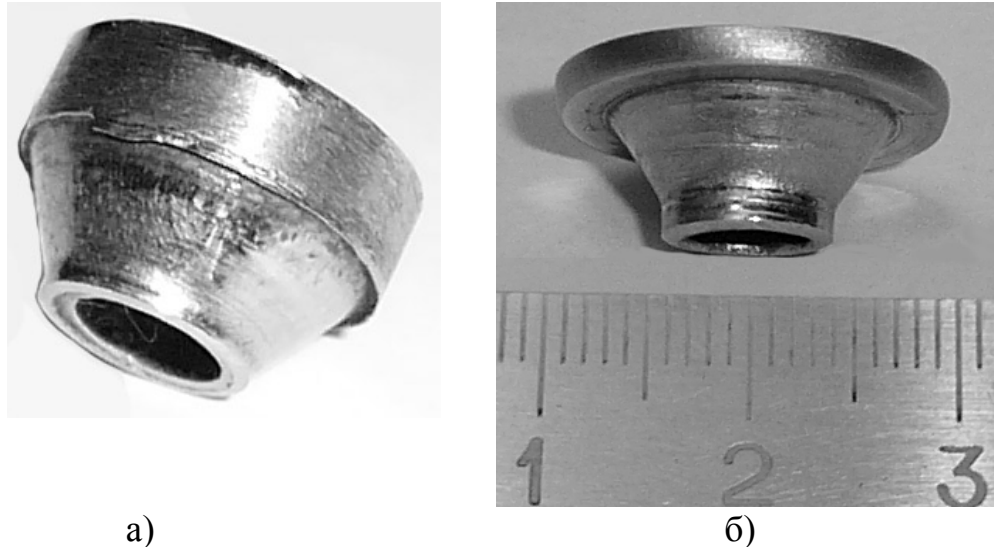


Рис. 9 Экспериментальные образцы: а) исходная заготовка; б) деталь, полученная методом комбинированного прямого выдавливания с высадкой.

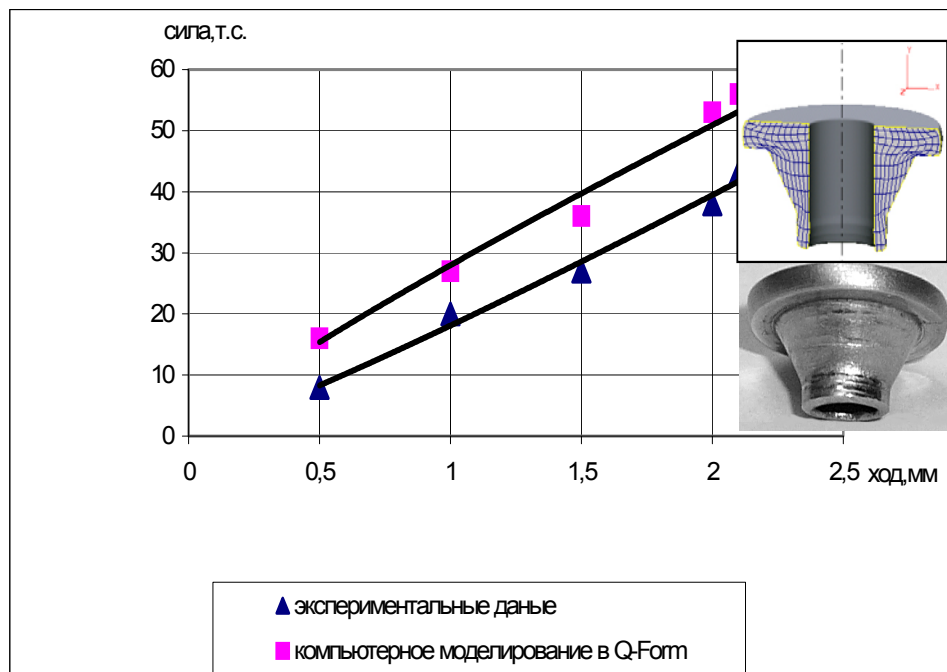


Рис 10. Сравнение зависимости усилия деформирования от хода ползуна

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.