

УДК 621.74.045

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КАМНЯМИ

Павличенко Екатерина Сергеевна

*Студент 6 курса,  
кафедра «Литейные технологии»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: Рыбкин В.А.,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные технологии»*

Литье с камнями, посаженными на воск, становится в ювелирной промышленности все более широко применяемой и рентабельной технологией. Самое очевидное преимущество это низкая оплата труда. Закрепка камней в воск дает значительную экономическую выгоду и сокращает время производства изделий. Технология позволяет экономить 50-80% затрат на закрепке, подготовке модели и изготовлении восковок.

Кроме того, камни держатся крепче, потому что металл заливается вокруг камней и усаживается при охлаждении, таким образом, формируется плотный обод вокруг камней. Все камни, особенно мелкие, выглядят более крупными, потому что требуется меньше металла для удержания камней.

За последние несколько лет данная технология значительно улучшилась и была внедрена во многие фирмы по всему миру, в производство как золотых, так и серебряных ювелирных изделий. Однако, несмотря на огромное количество экспериментов и статей, многие производители до сих пор сталкиваются с нерешёнными проблемами.

Процесс это сложный, зависящий от множества факторов — станков, инструментов и материалов (в первую очередь от модельных составов, восков, формомасс, используемых сплавов), а также разнообразных процессов — изготовления мастер-модели, отжига, плавления, термоудара и т.п. От строгого соблюдения всех условий, диктуемых всеми этими элементами технологии, зависит успешный процесс и качественный результат литья с камнями (без повреждения камней).

Задачей исследования было изучение данного технологического процесса, с целью получения рекомендаций по всем этапам производства, а так же подробное рассмотрение вопроса термосилового взаимодействия камней с металлом и формой при заливке, с целью получения оптимальных параметров литья для снижения стоимости и уменьшения брака изделий. Для повышения качества процесса литья с камнями и снижения брака, была поставлена задача сбора и обобщения сведений по каждому этапу технологического процесса, с целью подбора оптимальных материалов и параметров. Кроме того, необходимо теоретическое обоснование процесса при заливке и затвердевании формы. На этих этапах существует наибольший риск повреждения камней.

На основе анализа литературных источников, рекомендаций производителей оборудования и расходных материалов для ювелирного литья, а также проведения опытных заливок и расчетов были выявлены основные проблемы и предложены поэтапные рекомендации для технологического процесса изготовления изделий с камнями, посаженными на воск.

### **Проблемы технологического процесса**

В процессе литья металл нагревается до высоких температур, которым подвергаются и камни. В форме, под действием высоких температур, возникают

термические процессы расширения, напряженное состояние. Все это может привести к образованию ряда дефектов в камнях:

1. Потеря блеска у камней.

Причины:

- неверная температура формы под заливку,
- температура металла литья слишком высокая,
- неприемлемая формовочная смесь,
- нет специальных добавок.

2. Камни чернеют (камни приобретают тёмный обод вокруг рундиста после литья).

Причины:

- сплав не предназначен для литья с камнями,
- температура металла слишком высокая.

3. Камни трескаются или ломаются.

Причины:

- камни касаются друг друга в восковой модели,
- камни частично перекрываются,
- неправильный сплав,
- наличие дефектов в камнях.

4. Камни меняют цвет.

Причины:

- камни не предназначены для литья,
- термообработанные камни,
- температура формы и температура металла не идеальны

5. Камни частично покрываются металлом.

Причины:

- заднее посадочное отверстие слишком мало,
- резиновая форма вырезана неправильно,
- восковки не были хорошо проверены,
- во время посадки камней в воск, они были нагреты, что стало причиной наплыва воска на камень,
- восковки имеют поверхностное натяжение,
- восковки неправильно напаяны на стояк,
- неправильно приготовлена формомасса.

6. Камни не держатся в посадочном месте.

Причины:

- неправильный подбор размера камней
- посадочное место было сделано без сквозного отверстия,
- заднее посадочное отверстие слишком мало,
- восковки не были хорошо проверены.

7. Камни не полностью окружены металлом или выпадают после литья

Причины:

- Неправильное посадочное место в мастер-модели,
- Недостаточный питатель в мастер-модели,
- Восковки не были проверены перед посадкой камней,
- Камни не жёстко держались в восковке,
- Использовались некалиброванные камни или камни с неправильным размером,
- Слишком низкая температура литья,
- Недостаточное давление вакуумирования во время литья

Другие реже появляющиеся проблемы:

- деформация отливки,
- камни с чёрными точками,
- неодинаковый уровень камней (по короне),
- нечёткий металл между камнями,
- металл запятнал камни,
- пористость в отливках.

Кроме того, существует ряд технологических проблем, ограничивающих применение данного процесса:

- нельзя использовать камни больших размеров,
- не все виды камней пригодны для литья,
- не все виды закрепки могут быть применены для литья,
- потеря времени при остывании опоки до комнатной температуры

Для решения и устранения данных проблем необходимо создание и соблюдение четкой отработанной технологии, а также тщательный контроль на каждом этапе производства.

### **Рекомендации по используемым сплавам и камням**

Для литья с камнями возможно использование различных марок сплавов золота и серебра. Главные показатели этих сплавов должны быть:

- не окисляться во время плавки,
- металл мягкий и нехрупкий,
- низкая усадка сплава.

Наиболее пригодными сплавами, позволяющими достичь высокого качества без дополнительных требований, являются:

- палладиевое белое золото,
- белое золото с пониженным содержанием никеля,
- жёлтое золото,
- красное золото,
- сплавы серебра.

Наиболее сложным для отливки с камнями являются сплавы белого золота на основе никеля. Эти сплавы обладают достаточно высокими температурами литья и быстрее затвердевают, чем обычное красное золото. Следовательно, возникает больше проблем при литье. В белом золоте более часто встречается усадочная пористость из-за быстрого охлаждения на участках рядом с оправой камня.

Подбор камней является очень важным этапом. Не все камни возможно применять для данной технологии.

Основные требования, предъявляемые к ювелирным вставкам:

- точные размеры, высокое качество огранки
- отсутствие дефектов и включений
- стойкость к высоким температурам

Несоблюдение этих требований может привести к необратимым изменениям: вставки могут потрескаться, помутнеть или поменять цвет.

Для литья с камнями используют ювелирные камни как натуральные, так и синтетические. При этом очень важно, чтобы такие камни могли сопротивляться механическим, термическим и химическим воздействиям. Сопротивляемость драгоценных камней к высоким температурам и кислотам во многом зависит от их химического состава. Температура может воздействовать на структуру кристалла, а также на его химический состав. Большое влияние на сопротивляемость драгоценных камней имеют случайные включения, трещины, колебания химического состава и плотности, строение кристаллической решетки и ряд других причин. Синтетические камни практически всегда обладают высокими качественными характеристиками, в них

нет трещин, включений и других дефектов. Поэтому эти камни выдерживают высокие температуры и могут быть использованы при литье.

Не следует использовать камни семейства кварцев, камни с инклюзиями и трещиноватые, а также термочувствительные камни. Потрескаться могут и камни, содержащие даже следы углерода. Такие камни могут сгореть, растрескаться либо обесцветиться при высоких температурах.

Таким образом, основной принцип, которым руководствуются при выборе вставки для литья с камнями - это его качественные характеристики: твердость, плотность, прозрачность, цвет, блеск, прочность, химическая стойкость.

В настоящее время наиболее часто для литья с камнями используют кубический цирконий (фианит). Непригодны для данного способа: изумруд, аметист, аквамарин, бирюза, топаз, опал, турмалин, жемчуг.

### **Выбор рабочих чертежей**

В массовом производстве ювелирных изделий эти чертежи служат отправной точкой для создания пресс-формы. В этом процессе тиражируются и все исходные дефекты и добавляются еще новые. Именно поэтому для качественного технологического процесса рабочие чертежи так важны. Следует использовать модели, специально предназначенные для посадки камней на воск или производить корректировку имеющихся моделей.

Камни с острыми углами, вроде маркизы, багета и принцессы, требуют специальной обработки, чтоб не раскололись от усадки металла при охлаждении или от скачкообразного термоудара. Конструкция модели должна быть такой, чтобы тепло от металла через камни равномерно и быстро распределялось по формомассе.

При корректировке модели надо учитывать коэффициент усадки и брать камни меньшего диаметра, чем предусмотренные для обычной модели. Усадка пресс-формы и золота даст давление на камни, из-за чего они могут треснуть.

Крепление камня должно быть хорошо продумано, и обеспечивать его опору на металл, как минимум, в двух местах, впоследствии окруженных формовочной массой. Крепление должно обеспечивать надежное удержание камня сначала воском, а потом формовочной массой, как минимум, в двух точках, чтобы он мог выдержать усадку при прокаливании опоки и литье без расшатывания и смещения. С другой стороны, если камень крепится более чем в двух местах и сидит очень плотно, есть риск его разрушения. Кроме того, конструкция крепления должна обеспечивать равномерный и быстрый отвод тепла от металла через камни по формомассе. Крупные камни иногда растрескиваются оттого, что рундист нагревается быстрее площадки камня.

Наиболее распространенные виды закрепок, используемые для литья с камнями:

#### **1. Крапановая.**

Крапана мастер-модели должны иметь проточенные V-образные канавки для рундиста, чтобы камни можно было надежно "защелкивать" на место с обеспечением надежной фиксации.

#### **2. Глухая.**

Необходимо сделать сквозные отверстия в дне каста, для удержания камня после вытопки воска.

#### **3. Корнеровая.**

#### **4. Рельсовая.**

Следует учесть усадку металла и предусмотреть достаточное пространство между камнями. Они должны сидеть довольно близко друг к другу, но не соприкасаться. При охлаждении металла камни сближаются, и какой-то из них может треснуть по рундисту. Необходимо предусмотреть зазор между ними порядка 0,1 – 0,5 мм.

### **Установка камней в готовую восковую модель**

На этом этапе необходимо проводить тщательный контроль качества восковых моделей на отсутствие дефектов. Перед установкой ювелирных вставок в восковую модель нужно тщательно проверить оправу камня, крапана. Эти участки практически невозможно будет обработать после заливки металла.

Воск для моделей должен обладать хорошей "памятью", быть достаточно жестким и иметь минимальную зольность. Применение обычного воска, не обладающего достаточной памятью, часто приводит к неплотной посадке камней и проблемам литья.

При установке камней в готовую восковую модель необходимо соблюдать осторожность: даже небольшой дефект будет неисправим после отливки в металле. Может потребоваться небольшая дополнительная коррекция положения камней по высоте и зазоров между ними, примерно 0,1–0,5 мм. Особенно это важно при рельсовой закрепке.

### **Сборка модельного блока**

Восковки с камнями могут быть припаяны на стояк любой длины. Для более длинных ёлок (более, чем 6 ярусов), сила металла может быть причиной повреждения камней на верхних ярусах.. Желательно использовать восковые ёлки с восковками без камней в крайних двух ярусах и восковки с камнями в середине ёлки.

Угол между питателем и стояком должен составлять  $70 - 80^\circ$ . Такое расположение способствует наилучшему удалению газов из формы перед процессом заливки формы при использовании машин с донным разливом.

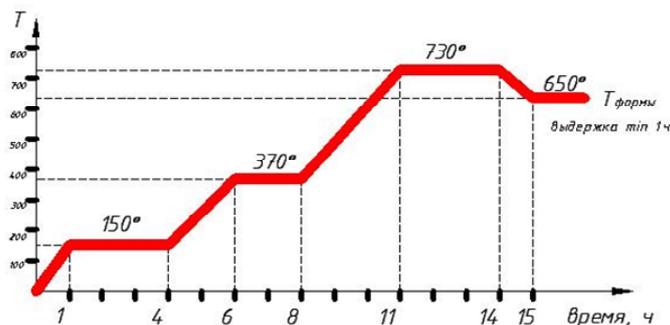
### **Формование опок**

Технология литья с камнями требует применения специальных формовочных смесей с мелкодисперсной структурой. Такие смеси благодаря своим свойствам защищают камни от высоких температур при прокаливании. Во время проведения самого процесса смешивания и заполнения опок формовочной массой необходимо произвести качественную дегазацию смеси вакуумом, для полного удаления воздуха с поверхности восковых моделей и особенно – с участков оправы камней. Эти места практически не поддаются обработке после литья.

### **Прокаливание опок**

При литье с камнями очень важен температурный режим цикла прокаливании. Этот этап может вызвать много проблем, если не соблюдены самые оптимальные критерии. Из-за слишком высокой температуры камни могут подгореть или обесцветиться. Печь должна прогреваться равномерно, чтобы так же равномерно прогревались и опоки. Загрязнения, имеющиеся в печи, также могут привести к обесцвечиванию камней. Рекомендуемая температура печи не должна превышать 482-500°C. Однако, такая низкая температура опоки приводит к литейным дефектам, таким как недоливы филигранных изделий, а так же к усадочной пористости. Опытным путем было установлено, что синтетические камни выдерживают более высокие температуры прокаливании формы. Установленный оптимальный цикл прокаливании приведен на рис. 1.

Стандартный цикл прокаливания опоки



Цикл прокаливания опок "литье с камнями"

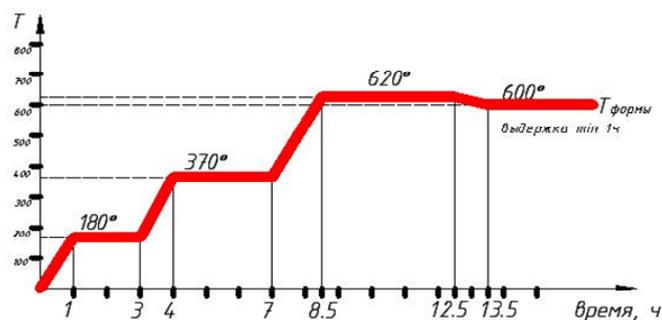


Рис. 1. Циклы прокаливания.

#### Цикл литья для опок с установленными камнями

Наиболее оптимальным является оборудование для донного литья под действием вакуума и избыточного давления, обеспечивающих равномерный поток металла. В настоящее время существуют литейные машины, которые позволяют добиться разницы давления нужного уровня. Некоторые модели характеризуются подачей избыточного давления, которое обеспечивает отличное заполнение при литье на низких температурах.

Опытные заливки при разных режимах давления показали, что данный параметр не существенно влияет на качество отливок. Наиболее важным параметром для получения качественных изделий является температура заливки металла.

На основе анализа и экспериментов установлена оптимальная температура заливки:  $T_{зал.} = 960 - 1020C^{\circ}$ . Такая температура позволяет добиться наилучшего качества литья без повреждения камней.

#### Постановка задачи термосилового взаимодействия системы «камень-металл-форма»

Для повышения эффективности процесса литья с камнями, снижения себестоимости изделий и уменьшения риска повреждения дорогостоящих камней, необходимо получение точных параметров режимов прокаливания и заливки форм, которые с максимальными гарантиями приведут к качественному результату. Такие параметры возможно получить математически смоделировав процесс литья с учетом всех термических и силовых воздействий на систему.

В качестве исходных данных для решения данной задачи были выбраны:

камень: фианит прозрачный  $ZrO_2 + 15\% Y_2O_3$

металл: сплав серебра  $925^{\circ}$ , двухкомпонентный:  $92,5\% Ag + 7,5\% Cu$

формомасса:  $CaSO_4 * \frac{1}{2} H_2O + SiO_2 \Rightarrow$  основа + огнеупорный материал  
 (25-30%) (70-75%) (гипс) (кварц+кристобаллит)

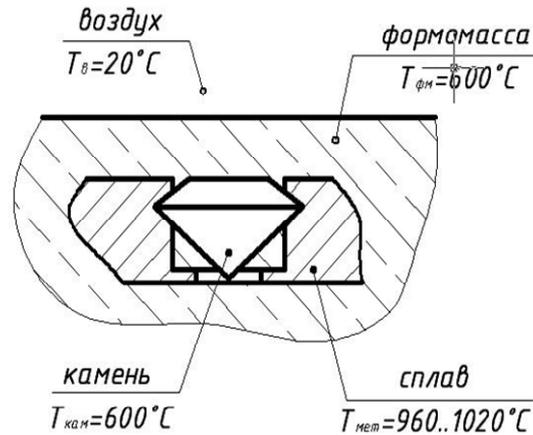


Рис. 2. Система «камень – металл – форма»

Математическая модель теплового взаимодействия в системе «металл-камень-форма» описывается уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \cdot \nabla^2 t + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$$

Для подбора оптимальных режимов необходимо составить полную картину распределения температурных полей в области камня во временной зависимости. По результатам решения тепловой задачи, возможно скорректировать цикл прокаливания формы и температуру заливаемого сплава.

При прокаливании формы и заливке в формомассе и в металле возникают напряжения, вызванные термическим расширением материалов и способные повредить камень. Поэтому, не менее важной задачей является определение напряжений, оказывающих воздействие на камень со стороны формомассы и со стороны металла во время затвердевания сплава.

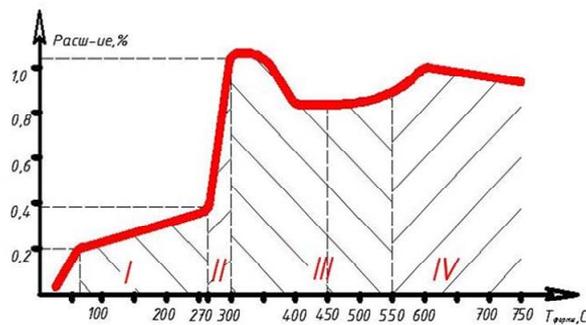


Рис. 3. Кривая термического расширения гипсовой формомассы SRS

- I – первичное расширение гипса при кристаллизации,
- II – переход из а- в б-кристабаллит,
- III – трансформация гипса в ангидридную форму,
- IV – переход кварца из а- в б-кристаллы

Данные задачи могут быть решены с использованием программного пакета Ansys. Необходимые входные данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства исследуемых материалов

Объекты исследования	Камень – фианит (оксид циркония, стабилизированный окисью иттрия) ZrO <sub>2</sub> +15% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Серебро Ag	Медь Cu
Теоретическая плотность	6,1 (г/см <sup>3</sup> )	10,5 (г/см <sup>3</sup> )	8,92 (г/см <sup>3</sup> )
КТЛР	9,3*10 <sup>6</sup> (1/град) При 25-800 °С	0,408 – 27,2*10 <sup>6</sup> (1/град) При 15-1100 К	9,3*10 <sup>6</sup> (1/град)
Теплопроводность	1,63 (Вт/м·град)	429 (Вт/м·К)	320 (Вт/м·град)
Удельная теплоемкость	0,69 (кДж/кг·град)	273 (Дж/кг·К)	440 (Дж/кг·К)

#### **Охлаждение и размывка опок**

Отлитые опоки нельзя подвергать размывке ранее, чем через 2-3 часа, до полного остывания, иначе возможно полное разрушение камней за счет термоудара. Очистка отлитых елок одна из самых трудных операций процесса литья с камнями. Основную часть формовочной массы можно отбить, постукивая молотком по прибыли центрального литника. Окончательную очистку можно провести струей воды под высоким давлением, используя водоструйную камеру и после промыть в ультразвуковой ванне. Так же возможно применение специальных растворов для удаления огнеупорной смеси. Но перед тем как помещать в них отливки, необходимо проверить химическую стойкость ювелирных вставок к этим растворам .

#### **Финишные операции**

Для ускорения процесса и повышения качества шлифовки и полировки, а так же для увеличения производительности, в первую очередь, необходимо использовать шлифовально-полировальные установки, для которых следует подбирать оптимальный комплект абразивных наполнителей с учетом твердости используемых для литья ювелирных вставок. Также необходимо отслеживать состояние оправы камней, чтобы не допустить их чрезмерного износа и повреждения. Следует исключить использование галтовки.

Предварительно может потребоваться обработка труднодоступных мест изделия, особенно оправы камня, электрохимическим способом или магнитными

иголками. Второе более предпочтительно, так как использование химполировки может оказать агрессивное воздействие на тонкие участки отливки, кранпы, за счет чего крепление камней может быть ослаблено.

### Реализация

По итогам проведенного исследования, с учетом полученных оптимальных параметров технологического процесса литья изделий с камнями, была произведена опытная заливка.

Для проведения эксперимента было использовано 6 различных видов кубического циркония, различающихся по качественным характеристикам, цвету и цене.

В качестве модели были выбраны серьги-пуссеты с крапановой закрепкой камней.

Всего было изготовлено 90 восковых моделей (по 15 для каждого вида камней).

Изделия изготавливались с четким соблюдением всех технологических требований.



Рис. 4. Блок-моделей



Рис.5 Полученные отливки

Таблица 2. Результаты

марка	Фианиты precision basic	Фианиты precision premium	Фианиты precision premium	Фианиты precision premium	Фианиты precision basic	Фианиты precision premium
диаметр, мм	4	4	4	4	4	4
цвет	бесцветные	бесцветные	черные	розовые	розовые	бесцветные
качество	низкое	среднее	среднее	среднее	низкое	высокое
цена	дешевые	средняя	средняя	средняя	дешевые	дорогие
количество	15	15	15	15	15	15
отливки						
брак	-	1	2	-	1	1
причина		выпадение камня из металла	выпадение камня из металла		выпадение камня из металла	выпадение камня из воска

Итого: брак составляет - 4,49%, а с учетом камня, выпавшего на этапе изготовления блока моделей – 5,56%.

Таблица 3. Виды брака.

Вид брака	Количество бракованных изделий
потеря блеска камня	-
потемнение камня	-
трещины в камне	-
изменения цвета	-
камень частично покрыт металлом	-
выпадение камня	5 (из них 1 – до заливки)

#### Выводы:

Единственным видом брака стало выпадение камней из посадочных мест. Основные причины выпадения камней - неправильное посадочное место в мастер-модели, недостаточный питатель в мастер-модели, восковки не были проверены перед посадкой камней, камни не жёстко держались в восковке. Следовательно, при дальнейшем производстве по данной технологии, необходимо уделить больше внимания контролю качества восковок и увеличить размеры питателей.

Выпадение камней является наиболее распространенным видом брака при использовании технологии литья с камнями.

Других видов брака в полученных изделиях – нет, а это означает, что для литья с камнями возможно использования различных видов фианитов, как по цене, так и по качеству, в зависимости от требований к изделию. Это опровергает распространенное суждение о том, что для литья с камнями возможно использование синтетических камней только наилучшего качества. Так же для литья с камнями обычно используют бесцветный кубический цирконий. В ходе эксперимента было выявлено, что возможно использование и цветных камней, так как они полностью сохраняют свой цвет.

#### Литература

1. *Валерио Фачченда*. Литьё по выплавляемым моделям. Справочник. World Gold Council. Перевод с английского – Омск: изд. дом «Дедал-Пресс», 2005 г. – 104 с.
2. *Бреполь Э.* Теория и практика ювелирного дела – Л, 1982.
3. *Халилов И.М.* Литьё с камнями – Махачкала, 2005 г.
4. статья «Процесс литья изделий с камнями», компания Рута ЮМ. Технологии, оборудование. №№4-5, 2005
5. Материалы доклада второго Международного Симпозиума Ювелиров, *Ирина Даллоз, Dalloz* (Франция)
6. «20 things You always wanted to know about stone casting», article by *Bryony Kirk*, Technical manager, SRS
7. «Stone casting process with invisible setting», article by *Dr. Hubert Schuster*
8. «Stone in wax setting: general casting advice on stone wax casting», article by SRS