

На правах рукописи



ФОМИН Алексей Александрович

**ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ
ИРИДИЯ И СПЛАВОВ ПЛАТИНЫ НА ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ
ЭТИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ШТАМПОВКИ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Логинов Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Готлиб Борис Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Мехатроника»;

Муйземнек Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории механики деформаций

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19 в ауд. И-420 (зал Ученого Совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «_____» ноября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мальцева Людмила Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Иридий и сплавы платины, благодаря таким свойствам как жаропрочность и тугоплавкость, сопротивление высокотемпературной коррозии и сопротивление окислению в контакте с оксидными материалами при высоких температурах, нашли широкое применение во многих областях промышленности. Примерами изделий из этих материалов могут служить стеклоплавильные аппараты из платиновых сплавов и иридиевая тигельная аппаратура. Работа стеклоплавильных агрегатов направлена на получение стекловолокна, применяемого для передачи оптического сигнала. Тигельная аппаратура применяется для получения оксидных монокристаллов, используемых в космической отрасли. Такие технологии включены в приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации как позволяющие создавать информационно-телекоммуникационные системы (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899). Однако, технологические процессы обработки давлением иридия, платины и их сплавов являются недостаточно изученными, в том числе по причине отсутствия сведений о реологических свойствах обрабатываемых материалов. В связи с этим, исследования, направленные на изучение реологии указанных благородных металлов и на совершенствование приемов их обработки следует **считать актуальной.**

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие научные программы:

- Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» Министерства образования РФ, государственный контракт от 22 марта 2010 г. № 02.740.11.0537;
- «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения (гос. задание №11.1369.2014/К от 18.07.2014);
- Проект N17 «Разработка технологии производства цельноштампованных донышек фильерных питателей шириной до 180 мм» и проект N19 «Разработка технологии производства цельноштампованных изделий из иридия» согласно приказу №7-2013 от 17.04.2013 г. генерального директора ООО «ЕЗ ОЦМ – ИНЖИНИРИНГ» Гроховского С.В. и генерального директора ОАО «ЕЗ ОЦМ» Боровкова Д.А.

Степень разработанности темы включает в себя изучение такой важной величины для выполнения расчетов, как сопротивление деформации для сплавов платины – в холодном состоянии, а для технически чистого иридия – в горячем состоянии, т.е. для условий их обработки. На основе полученных данных выполнены расчеты деформированного состояния в процессах холодной и горячей штамповки указанных материалов в производственных условиях. Следует отметить, что если для сплавов платины выполнен анализ

существующего процесса деформации, то для иридия процесс деформации пришлось создавать новый.

Целью работы является создание новых и совершенствование существующих процессов листовой штамповки заготовок из иридия и сплавов платины. Для достижения данной цели сформулированы **следующие задачи**:

- изучить сопротивление деформации сплавов платины в холодном состоянии, а технически чистого иридия – в горячем состоянии;
- поставить и решить краевую задачу штамповки дна стеклоплавильного агрегата и сделать выводы о корректности приемов и параметров штамповки;
- поставить и решить краевую задачу штамповки заготовки тигля из иридия и подобрать рациональные параметры деформации.

Научную новизну и теоретическую ценность представляют следующие результаты диссертации:

- впервые получены данные о реологических свойствах иридия и сплавов платины, определено деформированное состояние этих материалов в процессах листовой штамповки;
- выявлены закономерности заполнения штампа при многорядной штамповке сплавов платины, а также закономерности пластического течения иридия при горячей листовой штамповки, которые расширяют знания об особенностях деформации этих материалов.

Практическая значимость работы состоит в разработке рекомендаций по совершенствованию процесса листовой штамповки дна стеклоплавильного агрегата из сплавов платины (акт внедрения ОАО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов», г. Верхняя Пышма) и разработке технологии горячей штамповки иридиевых тиглей (акт внедрения ООО «ЕЗ ОЦМ – ИНЖИНИРИНГ», г. Верхняя Пышма).

Методология исследования построена на основных концепциях механики деформируемого тела, в том числе на применении основных гипотез (изотропности, несжимаемости и др.) и соответствующего математического аппарата.

Методы исследования включают:

- определение сопротивления деформации при испытаниях на растяжение проволочных образцов в холодном состоянии;
- определение сопротивления деформации при пластометрических испытаниях цилиндрических образцов на сжатие в горячем состоянии;
- аналитическое определение деформированного состояния на основе решения основной системы дифференциальных уравнений, сформулированной в рамках теории пластичности;
- приближенное решение краевых задач методом конечных элементов в программных модулях ПЛАСТ, ABAQUS, DEFORM, PAM-STAMP и QFORM.

Положения, выносимые на защиту:

- получение новых данных, описывающих зависимость сопротивления деформации от степени деформации для сплавов платины в холодном состоянии;
- получение базы данных сопротивления деформации в функции степени деформации, скорости деформации и температуры для иридия в горячем состоянии;
- определение формоизменения в процессах холодной штамповки сплавов платины в многорядном щелевом штампе опытным и расчетным методами с целью усовершенствования процесса производства элементов стеклоплавильных агрегатов для производства стекловолокна;
- расчет деформированного состояния методом конечных элементов в процессах горячей листовой штамповки иридия с выбором рационального варианта с целью производства тиглей из сверхжаропрочного и коррозионно-стойкого материала.

Степень достоверности результатов работы подтверждена статистической обработкой полученных данных по сопротивлению деформации, сравнением рассчитанных параметров формоизменения с результатами опытно-промышленных работ.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов: – Екатеринбург, 2012; Региональная научно-практическая конференция «Наука-Образование-Производство»: – Нижний Тагил, 2013; XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов: – Екатеринбург, 2013; Международная научно-практическая конференция «Молодежь и наука»: – Нижний Тагил, 2014; XV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов: – Екатеринбург, 2014.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 11-ти печатных трудах, в том числе три статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Одна статья вошла в международную базу Scopus.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, описывающий основные физико-механические свойства иридия и сплавов платины и области применения изделий из указанных материалов. Также отражены промышленно применяемые методы холодной штамповки заготовок из сплавов платины в производстве элементов стеклоплавильных аппаратов и методы горячей листовой штамповки осесимметричных изделий из иридия. Кроме того, приведено

описание программных продуктов для анализа напряженно-деформированного состояния в операциях штамповки, использованных в диссертационной работе.

Вторая глава посвящена изучению технологических свойств сплавов платины и иридия. В ходе изучения использована комбинированная методика проведения холодных испытаний сплавов на основе растяжения проволочных образцов в условиях небольших степеней деформации и измерения условного предела текучести для образцов с высокой степенью нагартовки. Показана возможность получения монотонной зависимости при использовании комбинированного подхода.

Получены значения сопротивления деформации сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 при скорости деформации $0,008...0,01 \text{ с}^{-1}$ в диапазоне степеней деформации $0...1,728$. Установлено, что метод растяжения образцов позволяет получить данные по сопротивлению деформации при достижении относительного удлинения не выше 12%. Метод определения сопротивления деформации измерением условного предела текучести позволил получить данные при относительном удлинении 82%. Полученные зависимости представлены в графическом (Рисунок 1) и аналитическом виде. Выявлено, что при наибольшей нагартовке сопротивление деформации сплава достигает 520 МПа.

Также в ходе исследования получены кривые упрочнения для сплавов ПлРд-10 и ПлРд-10ДУ (Рисунок 2), описывающие зависимости сопротивления деформации от степени деформации в холодном состоянии, методом наименьших квадратов получены соответствующие уравнения регрессии.

Кроме того выполнены горячие пластометрические испытания иридия марки И99,9 в диапазоне температур $800...1400^\circ\text{C}$ и скорости деформации $0,2...20 \text{ с}^{-1}$ (Рисунок 3). Выявлены особенности поведения кривых упрочнения иридия от скорости деформации. При малой скорости ($0,2 \text{ с}^{-1}$) упрочнение металла имеет место во всем интервале степеней деформации вплоть до $\epsilon = 0,8$. С увеличением ϵ выше 0,6 упрочнение замедляется. При более высокой скорости (2 с^{-1}) упрочнение заканчивается при $\epsilon = 0,6$ и стабилизируется при дальнейшем увеличении ϵ без признаков динамического разупрочнения. При большой скорости деформации (20 с^{-1}) упрочнение заканчивается также при $\epsilon = 0,6$, однако при дальнейшем увеличении ϵ наблюдается динамическое разупрочнение, сопровождающееся небольшим снижением величины σ_s . Интенсивность упрочнения иридия при одинаковых температурах практически не зависит от скорости деформации. Наибольшее упрочнение имеет место при температурах 800 и 900°C , т.е. при температурах ниже температуры рекристаллизации, которая для иридия равна 1000°C . При температурах выше 1000°C вплоть до 1400°C интенсивность упрочнения уменьшается незначительно.

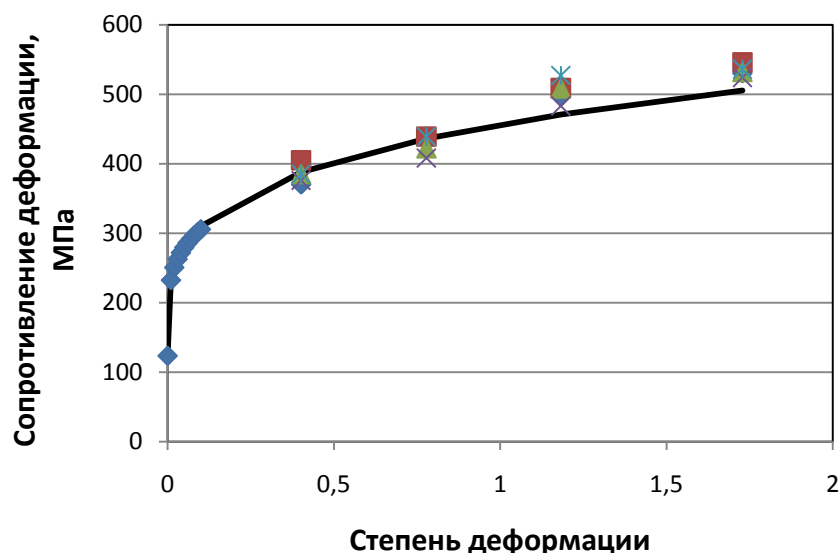


Рисунок 1 – Кривая упрочнения сплава ПтПдРдРу 81-15-3,5-0,5 при больших деформациях: точки – опытные данные, линия – по уравнению регрессии

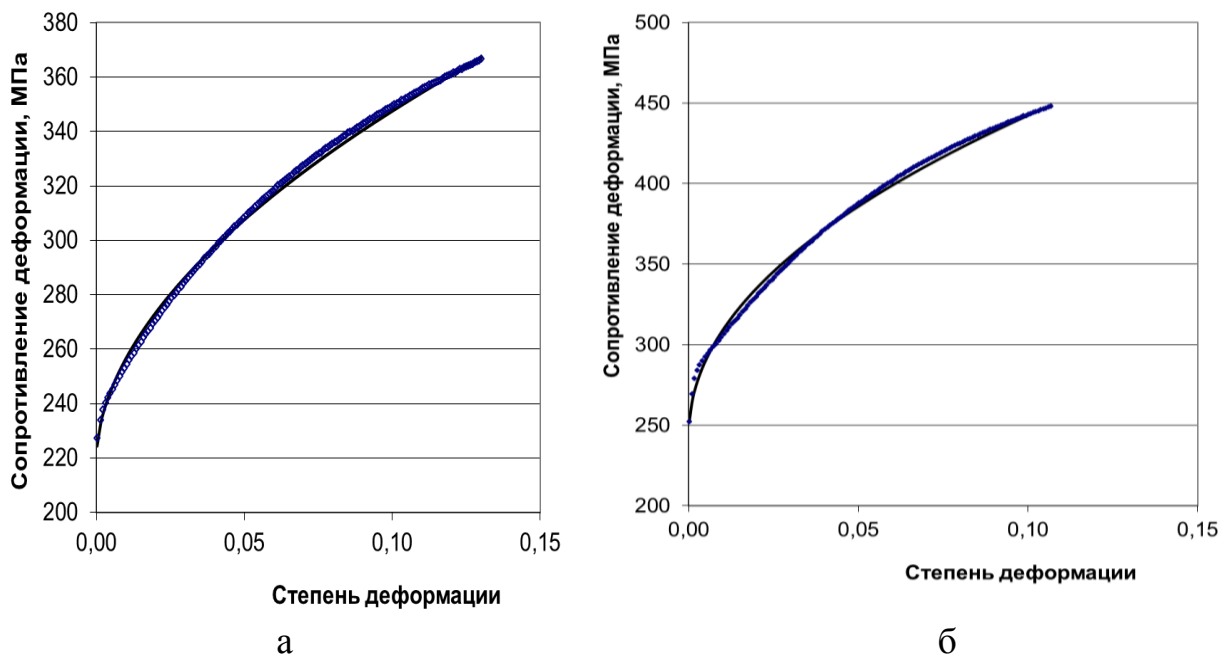


Рисунок 2 – Кривые упрочнения для сплавов ПтPd-10(а) и ПтPd-10ДУ(б): точки – опытные данные, линии – по уравнению регрессии

В итоге построена аналитическая зависимость сопротивления деформации иридия от исследуемых термомеханических параметров (степени, скорости и температуры деформации), позволяющая рассчитать уровень сопротивления деформации иридия при любом значении указанных факторов в исследованных пределах. Проведенные расчеты показали, что выявленная аналитическая зависимость дает наиболее точные результаты при степенях деформации 0,2 – 0,6.

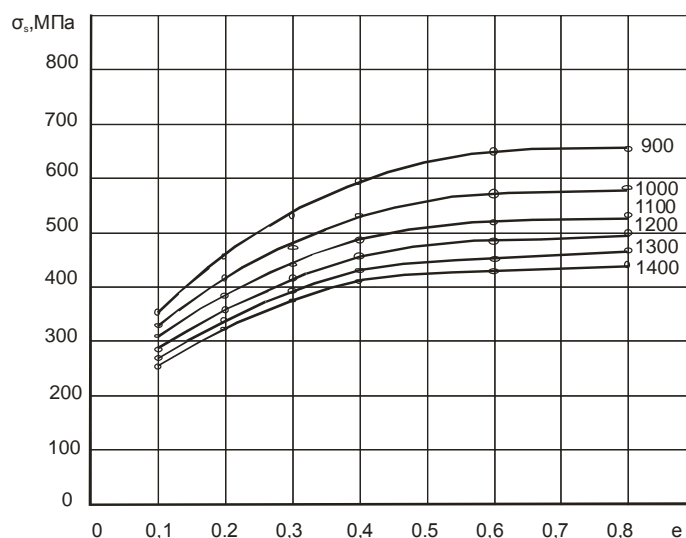


Рисунок 3 – Кривые упрочнения иридия при скорости деформации $0,2 \text{ с}^{-1}$

В третьей главе проведен анализ результатов выполнения производственных операций холодной штамповки сплавов платины в технологии производства стеклоплавильных сосудов, а именно первой операции штамповки фильерного дна. Выявлено, что стандартная технология обработки заготовки на первой операции штамповки дна приводит к интенсивному продольному течению металла и, как следствие, к образованию дефектов (Рисунок 4).

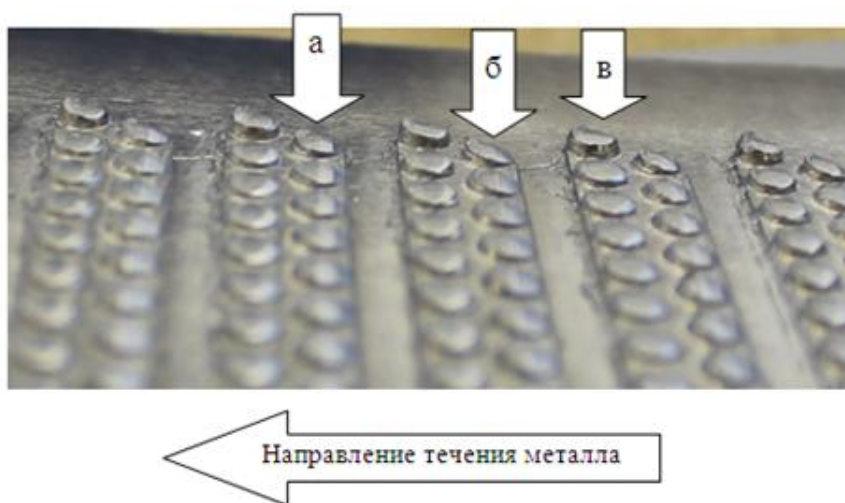


Рисунок 4 – Виды несовершенств заполнения штампа:

а – несимметричное заполнение первого полуяряда; б – срез металла первого полуяряда; в – увеличенная глубина заполнения второго полуяряда

Наблюдается явное отличие первого и второго полуяряда каждого ряда выступов по форме, вследствие несимметричного заполнения отверстий штампа. Также выступы второго полуяряда имеют большую высоту, по сравнению с первым полуярядом. Дефекты заготовки, полученные на первой операции, оказывают отрицательное влияние на протекание второй операции. Неравномерное заполнение штампа часто приводит к поломке формообразующих бойков и, соответственно, увеличения срока изготовления и стоимости изделия.

Поэтому для данного технологического процесса остро стоит задача повышения равномерности заполнения штампа первой операции штамповки.

Для количественной оценки заполняемости штампа на первой операции штамповки фильерного дна была произведена первая операция штамповки на производственной площадке ОАО «ЕЗ ОЦМ». Для этого была использована заготовка в виде полосы толщиной 4,0 мм, штамп с отверстиями на 19 фильер (9 фильер в первом полуряде и 10 фильер во втором), боек с размерами плоской части 10 x 80 мм. Усилие прессы при штамповке составило 120 тс, что с учетом размеров плоской части бойки развивает давление 1470 МПа на контактной поверхности. В итоге была получена полоса толщиной 2,5 мм с выступами, размеры которых приведены в таблице 1. Измерение проводилось с помощью индикаторной головки часового типа, установленной на штативе, в нескольких точках, расположение которых показано на рисунке 5. Точки замера №1 и №2 соответствуют первому полуряду, точки №3 и №4 – второму.

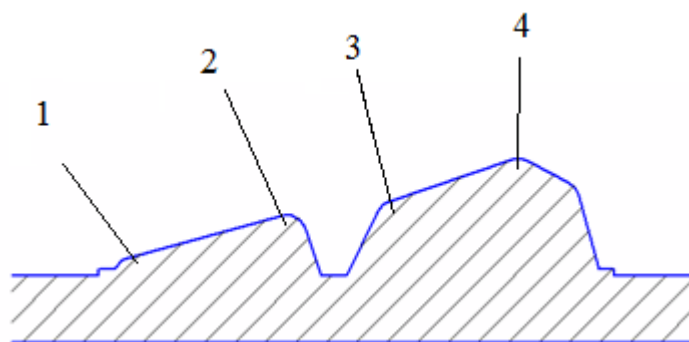


Рисунок 5 – Схематичное изображение полученных выступов и расположение точек замера высоты

Таблица 3.1 – Результаты измерения высоты выступов, полученных по стандартной технологии ОАО «ЕЗ ОЦМ»

№ точки замера	Высота выступа, мм									
	1	2,23	2,17	2,15	2,12	2,10	2,11	2,13	2,16	2,21
2	2,39	2,35	2,33	2,31	2,30	2,34	2,30	2,38	2,41	-
3	2,70	2,71	2,68	2,69	2,67	2,68	2,70	2,66	2,69	2,73
4	2,87	2,82	2,74	2,75	2,73	2,74	2,76	2,77	2,80	2,93

Введем следующие параметры, характеризующие неравномерность заполнения штампа:

1) ΔV – характеризует различие между полурядами по форме выступов и численно равен $(V1 - V2)$, где $V1$ – среднее значение разности между наибольшей и наименьшей высотой выступа первого полуряда, $V2$ – среднее значение разности между наибольшей и наименьшей высотой выступа второго полуряда;

2) ΔH – характеризует различие между полурядами по высоте выступов и численно равен $(H1 - H2)$, где $H1$ – средняя высота первого полуряда, $H2$ – средняя высота второго полуряда.

Для стандартной технологии введенные параметры примут следующие значения: $V1 = 0,19$ мм; $V2 = 0,10$ мм; $\Delta V = 0,09$ мм; $H1 = 2,25$ мм; $H2 = 2,74$ мм; $\Delta H = 0,49$ мм. Параметр $V1 > V2$, что является следствием наличия наклонной площадки у выступов первого полурияда и более правильной формы второго полурияда. Параметр $H2 > H1$, что подтверждает больший объем выступов второго полурияда по сравнению с первым.

Далее аналитическим методом решена краевая задача холодной штамповки одного канала стеклоплавильного аппарата. Применительно к одному отверстию краевую задачу такого типа рассматривают либо в осесимметричной постановке, и тогда в роли щели выступает круглое отверстие, а заготовка рассматривается как круглый цилиндр, либо в плоской постановке, и тогда в роли щели выступает отверстие в бесконечной плите, а заготовкой служит бесконечная пластина.

Очаг деформации рассмотрен (Рисунок 6) в наиболее простой плоской постановке при использовании декартовой системы координат x, y, z (ось z направлена перпендикулярно плоскости чертежа). Верхний полуштамп выполнен с гладкой рабочей поверхностью. Нижний полуштамп 2 имеет прорези (щели), через которые возможно истечение металла при воздействии на верхний полуштамп силы прессы P .

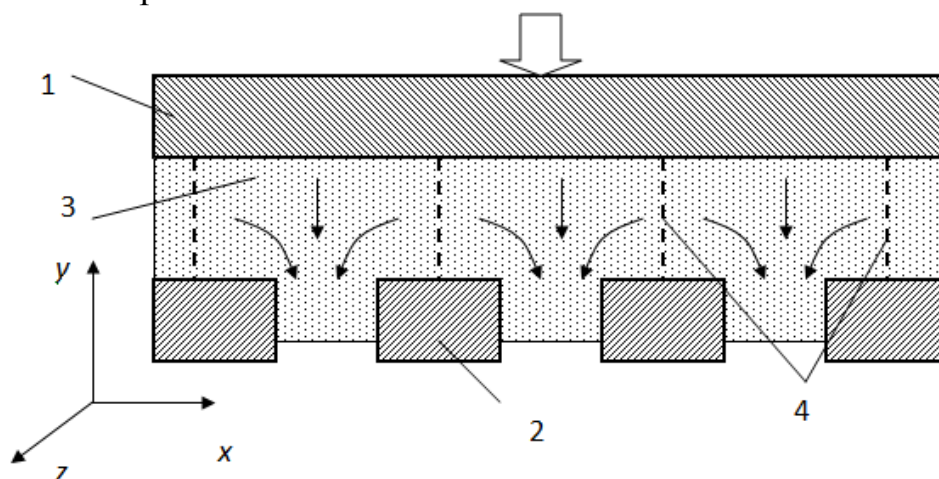


Рисунок 6 – Схема течения металла в многорядном щелевом штампе:
1 – верхний полуштамп; 2 – нижний полуштамп; 3 – деформируемый металл;
стрелки – направление перемещения металла

Штамп имеет большую длину в направлении оси z , поэтому течение вдоль этой оси затруднено, и компонента скорости деформации $v_z = 0$. В результате заготовка находится в условиях плоского деформированного состояния.

Допущено, что рассматриваемые отверстия расположены достаточно далеко от края плиты, и поэтому можно считать, что свободных поверхностей сбоку деформируемая пластина не имеет.

В результате картина течения у каждого из отверстий окажется симметричной. Ее можно описать следующим образом. Из середины перемычек между отверстиями проведем вертикальные линии, которые будут являться нейтральными сечениями. Слева и справа от них при обжатии полосы металл будет перемещаться зеркально. При этом вертикальные линии, проходящие через

центры отверстий, будут являться осями симметрии. Такая постановка позволяет выделить один из объемов деформируемого тела, рассмотреть его напряженно-деформированное состояние, а результаты такого анализа распространить на весь объем заготовки.

Введена следующая система обозначений (Рисунок 7): l – ширина щели; L – расстояние между нейтральными сечениями (оно же представляет собой расстояние между отверстиями); h – текущая толщина слоя при ее изменении от начальной H_0 до конечной H_1 , $h_{\text{п}}$ – текущая толщина выдавленного в щель металла при ее изменении от 0 до $H_{\text{п}}$.

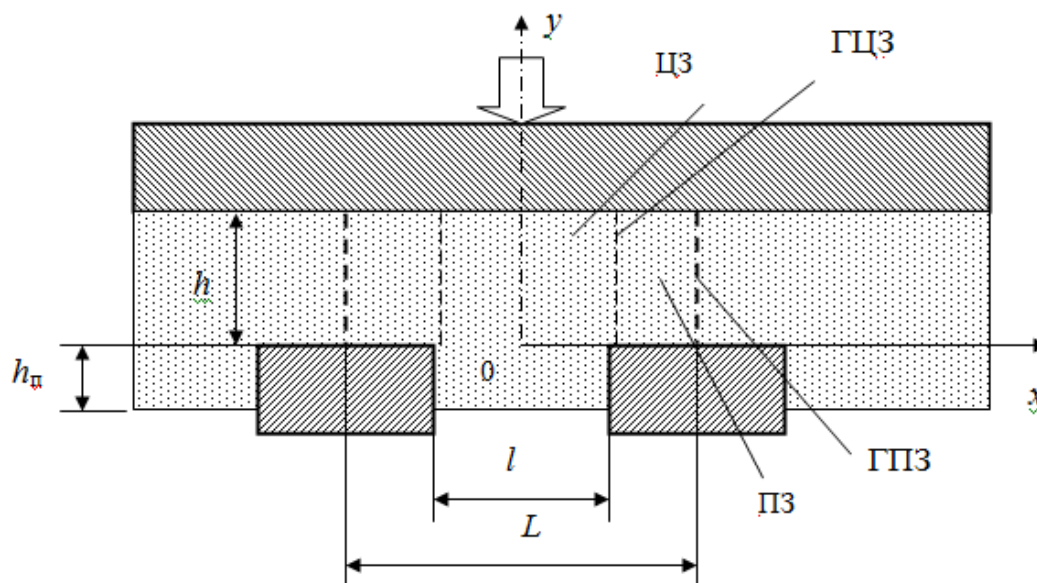


Рисунок 7 – Фрагмент течения металла в многорядном щелевом штампе: h – текущая толщина пластического слоя; $h_{\text{п}}$ – толщина выдавленного металла; ЦЗ – центральная зона, ПЗ – периферийная зона; ГЦЗ – граница центральной зоны; ГПЗ – граница периферийной зоны

Для выделенного фрагмента очага деформации применим условие постоянства объема:

$$L \cdot H_0 \cdot B = L \cdot H_1 \cdot B + l \cdot h_{\text{п}} \cdot B, \quad (1)$$

где $B = \text{const}$ – размер полосы в направлении оси z .

Отсюда следует, что

$$h_{\text{п}} = \frac{L}{l} (H_0 - H_1), \quad (2)$$

т.е. толщина выдавленного металла зависит от абсолютного обжатия, размеров щелей и расстояния между ними.

Попытка построить относительно простое поле скоростей не увенчалась успехом из-за сложности удовлетворения всех граничных условий. Поэтому вначале методом конечных элементов было выполнено моделирование деформации пластического слоя с помощью пакета прикладных программ ПЛАСТ. При наличии указанных выше граничных условий и при отсутствии трения получили картину распределения вертикальной составляющей

компоненты перемещения u_y (Рисунок 8). Здесь показана правая половина очага деформации и линии равного уровня с относительными значениями u_y (здесь и далее величины перемещений отнесены к перемещению инструмента и сделано допущение, что они пропорциональны скоростям перемещений).

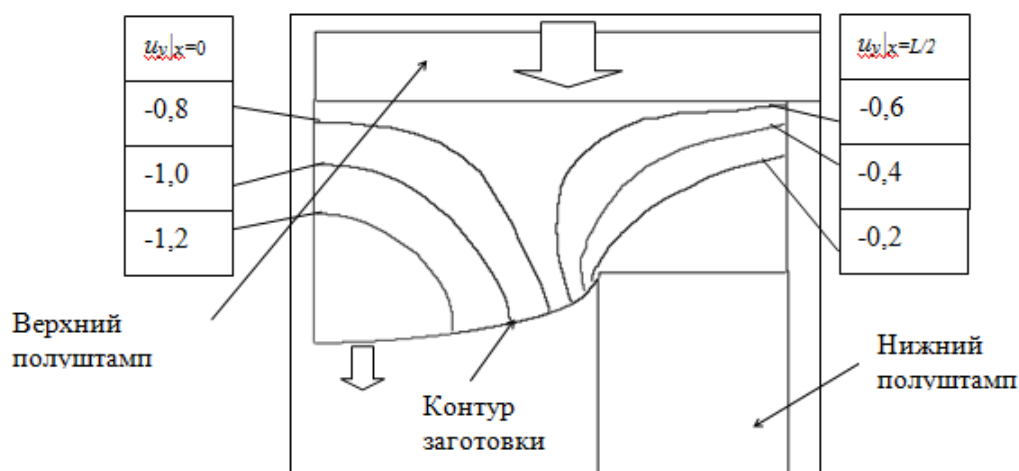


Рисунок 8 – Эпюры вертикальной составляющей перемещения при выдавливании пластического слоя через отверстие щелевого штампа

Приведенный расчет позволил составить первое впечатление о кинематически допустимом поле скоростей. Вертикальные компоненты перемещений увеличиваются сверху вниз в центральной части очага деформации и наоборот, уменьшаются на периферии. Из рисунка также видно, что очаг деформации удобнее поделить на две части: центральную и периферийную, а поле перемещений (или скоростей) состыковать между ними, воспользовавшись условием непрерывности нормальной составляющей перемещения (или скорости) на границе.

Горизонтальная составляющая перемещения имеет максимальное (по модулю) значение (Рисунок 9) вблизи границы центральной и периферийной зон и стремится к нулю в центре очага деформации и на границах между отдельными очагами.

С учетом граничных условий подходящая функция для описания компоненты v_y следующая:

$$v_y = -v \left[1 + \left(\frac{L}{l} - 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right]. \quad (3)$$

Для описания тензора скоростей деформации продифференцировали последнее выражение по координате y :

$$\xi_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{v}{h} \left(\frac{L}{l} - 1 \right). \quad (4)$$

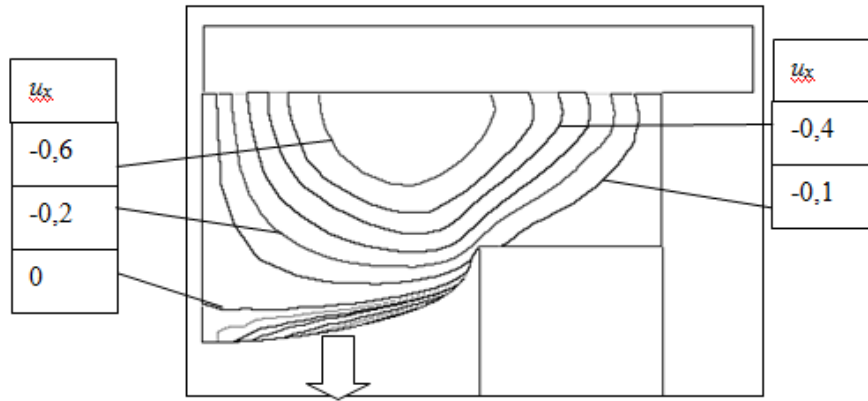


Рисунок 9 – Эпюры горизонтальной составляющей перемещения при выдавливании пластического слоя через отверстие щелевого штампа

Для несжимаемого материала

$$\xi_{xx} = -\xi_{yy} = -\frac{v}{h} \left(\frac{L}{l} - 1 \right), \quad (5)$$

откуда можно найти вторую компоненту скорости перемещения:

$$v_x = \int \xi_{xx} dx + f(y) = -\frac{v}{h} \left(\frac{L}{l} - 1 \right) x + f(y), \quad (6)$$

при использовании граничного условия $v_x|_{x=0} = 0$ получили $f(y)=0$ и окончательно

$$v_x = -\frac{v}{h} \left(\frac{L}{l} - 1 \right) x, \quad (7)$$

что не противоречит условию, в соответствии с которым горизонтальная скорость v_x в зоне ЦЗ является возрастающей по модулю функцией координаты x .

Поскольку рассматривается несжимаемый материал, то на границе зон ЦЗ и ПЗ следует состыковать нормальные компоненты скорости, чтобы не получить разрывов. Таким образом, следует применить еще одно граничное условие:

$$v_x|_{x=l/2}^{\text{ПЗ}} = v_x|_{x=l/2}^{\text{ЦЗ}}, \quad (8)$$

Вместе с тем, в отличие от зоны ЦЗ, для зоны ПЗ следует выполнить еще одно граничное условие

$$v_x|_{x=L/2}^{\text{ПЗ}} = 0, \quad (9)$$

что следует из необходимости стыковки горизонтальных компонент скорости на границах периферийных соседних зон ГПЗ.

Последним двум граничным условиям удовлетворяет подходящая функция вида

$$v_x = -\frac{v}{h} \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad (10)$$

Особенностью этой функции является то, что она является убывающей по модулю относительно координаты x , что позволяет в совокупности с такой же функцией в зоне ЦЗ получить экстремум скорости на стыке зон.

После дифференцирования v_x получили для зоны ПЗ

$$\xi_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{v}{h} \quad (11)$$

Из условия несжимаемости при плоской деформации

$$\xi_{yy} = -\xi_{xx} = -\frac{v}{h} \quad (12)$$

что соответствует действительности: вдоль координаты y в этой зоне происходит сжатие металла.

Для нахождения компоненты скорости v_y выполним операцию интегрирования:

$$v_y = \int \xi_{yy} dx + f(x) = -\frac{v}{h} y + f(x) \quad (13)$$

Применим граничное условие для этой зоны:

$$v_y \Big|_{y=0}^{\text{ПЗ}} = 0 \quad (14)$$

после подстановки которого найдем произвольную функцию интегрирования: $f(x)=0$, окончательно

$$v_y = -\frac{v}{h} y \quad (15)$$

В результате достигнуто соответствие решению, полученному численным методом: в этой зоне вертикальная компонента является возрастающей по модулю функцией от координаты y .

Таким образом, в условиях поставленной задачи получены кинематические соотношения, позволяющие описать деформированное состояние заготовки при выполнении всех граничных условий и ограничений. Это открывает возможности для определения энергосиловых параметров процесса, оптимизации формы инструмента, учета влияния трения и других параметров формоизменения.

Отдельным вопросом является оценка износа штамповочного инструмента. Известно, что износ локализуется на поверхностях, где возникает высокий уровень касательных напряжений трения и реализуется повышенное скольжение металла. Скольжение характеризуется разностью перемещений поверхности инструмента и поверхности обрабатываемой заготовки. Наличие кинематически возможного поля скоростей перемещений позволяет найти компоненты вектора приращений перемещения u_i ($i = x, y$) по формулам

$$u_x = v_x * \Delta t, \quad u_y = v_y * \Delta t . \quad (16)$$

Далее для краткости компоненты вектора приращений перемещений будут называться просто перемещениями.

В зоне ЦЗ скольжение возникает на вертикальной поверхности инструмента при координате $x = \frac{l}{2}$.

Тогда для зоны ЦЗ

$$u_y = v_y * \Delta t = v_y * \frac{\Delta h}{v} = -\Delta h \left[1 + \left(\frac{l}{l} - 1 \right) * \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right]. \quad (17)$$

При $y=h$ $u_y = -\Delta h$, т.е. верхний слой металла перемещается вместе с деформирующей плитой.

При $y=0$ компонента перемещения $u_y^{max} = -\Delta h \left[1 + \left(\frac{l}{l} - 1 \right) \right] = -\Delta h \frac{l}{l}$ и она достигает максимального (по модулю) значения.

Отсюда следует, что вертикальные перемещения возрастают обратно пропорционально размеру отверстия, кроме того, они не зависят от координаты y . Для зоны ПЗ

$$u_x = v_x * \Delta t = v_x * \frac{\Delta h}{v} = -\frac{\Delta h}{h} \left(\frac{l}{2} - x \right). \quad (18)$$

При $x = \frac{l}{2}$ получили $u_x = 0$, что подтверждается условием растекания пластического слоя в два соседних отверстия, между которыми есть нейтральная плоскость, где горизонтальные компоненты скорости равны нулю.

При $x = \frac{l}{2}$ получили $u_x^{max} = -\frac{\Delta h}{h} \left(\frac{l}{2} - \frac{l}{2} \right) = -\frac{\Delta h}{h} \frac{l}{2} \left(\frac{l}{l} - 1 \right)$. Следует отметить, что при этой координате горизонтальные перемещения максимальны, поэтому износ будет локализован при $x = \frac{l}{2}$ либо на вертикальной поверхности, либо на горизонтальной поверхности. С целью сравнения интенсивности скольжения можно ввести отношение u_x^{max}/u_y^{max} :

$$\frac{u_x^{max}}{u_y^{max}} = \frac{-\frac{\Delta h l}{h 2} \left(\frac{l}{l} - 1 \right)}{-\Delta h \frac{l}{l}} = \frac{l \left(\frac{l}{l} - 1 \right)}{2 h \frac{l}{l}} = \frac{1}{2} \frac{l}{h} \left(1 - \frac{l}{l} \right). \quad (19)$$

Представленный очаг деформации состоит из двух составляющих, в каждой из которых можно определить мощность, необходимую для деформации несжимаемого материала заготовкой объемом V

$$N_{nз} = \int_{V_{nз}} T_{nз} H_{nз} dV, \quad N_{цз} = \int_{V_{цз}} T_{цз} H_{цз} dV \quad (20)$$

где T и H - интенсивности касательных напряжений и скоростей деформации сдвига, а индексы означают принадлежность к конкретной зоне.

Далее оценили величину H по зонам, используя компоненты девиатора скорости деформации ξ_{ij} ($j = x, y$):

для зоны ПЗ и ЦЗ соответственно

$$H_{nз} = 2\sqrt{\xi_{xx}^2 + \xi_{xy}^2} = 2\frac{v}{h}; \quad H_{цз} = 2\frac{v}{h}\left(\frac{L}{l} - 1\right) \quad (21)$$

Выражение мощности внутренних сил для двух зон деформации

$$N_{вс} = N_{nз} + N_{цз} = \int_{V_{nз}} T_{nз} H_{nз} dV + \int_{V_{цз}} T_{цз} H_{цз} dV \quad (22)$$

Применяя условие текучести $T = \tau_s$, получили

$$N_{вс} = 2\tau_s \frac{v}{h} [V_{nз} + \left(\frac{L}{l} - 1\right)V_{цз}]. \quad (23)$$

Объемы, охваченные пластической деформацией, при их протяженности B вдоль третьей координаты z , определяются формулами

$$V_{nз} = \frac{1}{2}(L-l)hB, \quad V_{цз} = \frac{1}{2}lhB. \quad (24)$$

С учетом последних формул получили

$$N_{вс} = \tau_s \frac{v}{h} hB \cdot [(L-l) + l] = \tau_s vBL. \quad (25)$$

Таким образом, мощность внутренних сил не зависит от соотношения размеров отверстия и размера пластической зоны. Это объясняется тем, что деформации подвергается как материал, находящийся напротив отверстия, так и пластический слой, расположенный между верхним и нижним инструментом.

Если пренебречь напряжениями трения, то используя условие сохранения энергии, при применении давления осадки p получим

$$p \frac{L}{2} Bv = \tau_s vBL, \quad \text{откуда } p = 2\tau_s.$$

Такое простое выражение удалось получить, потому что подобрано поле скоростей, не вызывающее разрывов на границе двух зон пластической деформации.

Рассчитаем усилие штамповки, приняв что $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$, $\varepsilon = \ln \frac{H_0}{H_K}$. Для стандартной технологии штамповки контактная площадь составляет 830 мм², толщина полосы в начале процесса равна 4,0 мм, в конце – 2,5 мм. Следовательно, $\varepsilon = 0,47$. Сопротивление деформации для сплава ПЛРД-10ДУ определим по зависимости, найденной в пункте 2.2. При рассчитанной степени деформации σ_s составит 662 МПа, тогда $\tau_s = 382,2$ МПа. Усилие штамповки найдем по формуле

$$P = p \cdot S = 2 \cdot 382,2 \cdot 830 = 64,7 \text{ тс.}$$

Расчетное усилие штамповки примерно в 2 раза меньше реального (120-130 тс), что объясняется пренебрежением напряжениями трения.

С помощью метода конечных элементов поставлена краевая задача одноканальной и многоканальной штамповки дна стеклоплавильного аппарата из платинового сплава. Для решения задачи в первом случае использован программный комплекс ABAQUS (рисунок 10), во втором – пакет программ DEFORM (Рисунок 11). Показано, что увеличение шага обработки заготовки до значения кратно равному расстоянию между двумя соседними рядами выступов позволяет уменьшить дефектность заготовки после первой операции штамповки дна стеклоплавильного аппарата.

Для проверки разработанного рацпредложения была проведена опытная первая операция штамповки на производственной площадке ОАО «ЕЗ ОЦМ». Были обеспечены те же самые условия, что и при испытании стандартной технологии, за исключением шага обработки, который был увеличен с 3 мм до 12 мм, а также усилия пресса, которое увеличено до 250 тс для получения необходимой конечной толщины полосы. Измерения полученных выступов производились по методике указанной выше, результаты приведены в таблице 2.

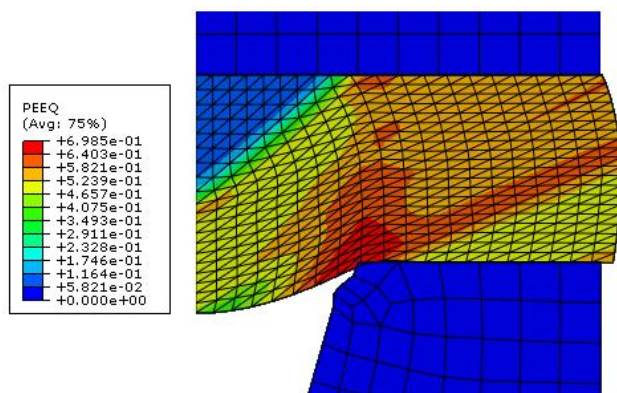


Рисунок 10 – Распределение значений эквивалентной степени деформации (области равного уровня и таблица их значений - слева)

Таблица 2 – Результаты измерения высоты выступов, полученных по опытной технологии

№ точки замера	Высота выступа, мм									
	1	3,53	3,51	3,50	3,49	3,49	3,50	3,53	3,51	3,52
2	3,55	3,53	3,51	3,52	3,50	3,51	3,53	3,52	3,53	-
3	3,58	3,57	3,55	3,56	3,55	3,56	3,58	3,57	3,59	3,60
4	3,85	3,81	3,78	3,76	3,75	3,77	3,78	3,82	3,83	3,86

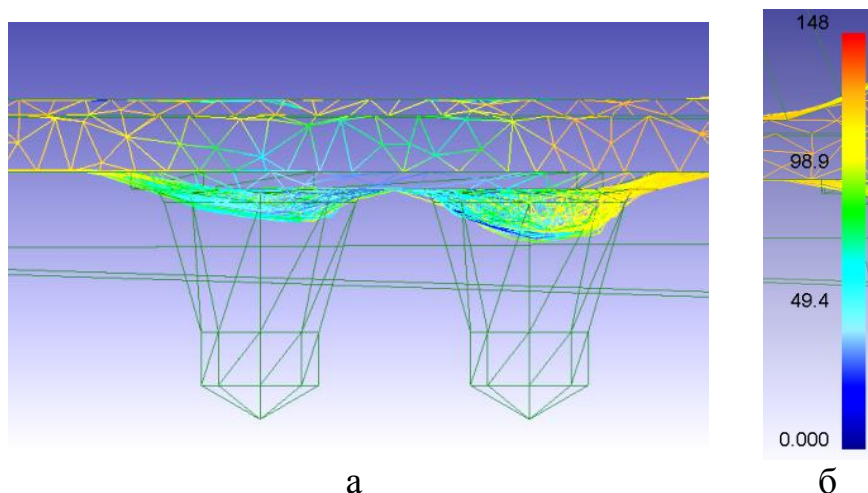


Рисунок 11 – Профили заполнения двух рядом расположенных ручьев штампа и значения (цветные уровни) эквивалентных напряжений (а) с цветовым ключом (б)

Рассчитаем параметры, характеризующие неравномерность заполнения штампа (Таблица 3), их значения сопоставлены с опытными величинами, приведенными в таблице 1.

Таблица 3 – Сравнение результатов штамповки по стандартной и опытной технологии

Параметр	Стандартная технология	Опытная технология
V1	0,19	0,01
V2	0,10	0,23
ΔV	0,09	- 0,22
H1	2,25	3,52
H2	2,74	3,67
ΔH	0,49	0,15

Параметр V1 уменьшился с 0,19 до 0,01 мм, что говорит о более равномерном заполнении отверстий первого полуряда, изменение в лучшую сторону произошло в 19 раз. Параметр V2 увеличился с 0,10 до 0,23 мм – это свидетельствует о появлении наклонной площадки на втором полуряде выступов, однако это не является дефектом в существующей технологии. Параметры H1 и H2 также увеличились с 2,25 мм до 3,52 мм и с 2,74 до 3,67 мм соответственно, значит с увеличением шага обработки заполнение штампа стало более полным. Параметр ΔH уменьшился – заполнение стало более равномерным.

Следовательно, такая технология увеличения шага обработки привела к более симметричному и более полному заполнению отверстий штампа. Однако она подразумевает и увеличение усилия штамповки в несколько раз.

В **четвертой главе** представлены результаты анализа горячей штамповки в технологии производства иридиевых тиглей. В рамках настоящей работы была поставлена задача разработки технологии горячей вытяжки иридиевого тигля. Для решения задачи были предложены следующие варианты технологии:

- 1) вытяжка за два перехода с использованием подвижного прижима;
- 2) вытяжка за шесть переходов без использования прижима;
- 3) вытяжка за один переход с применением неподвижного прижима;
- 4) вытяжка за один переход с применением неподвижного прижима и дополнительного неподвижного прижима для исключения образования складок.

Для проверки работоспособности предложенных вариантов было проведено моделирование процесса горячей вытяжки тигля в программных комплексах PAM-STAMP и QFORM.

Применение стандартного (исходного) инструмента в первых двух вариантах постановки задачи не позволило получить полностью бездефектное изделие, что подтверждается расчетом как в программе PAM-STAMP, так и в QFORM. К дефектам в данном случае относятся: складки на цилиндрической части изделия; большое утонение (более 20%) в области радиуса пуансона (Рисунок 12).

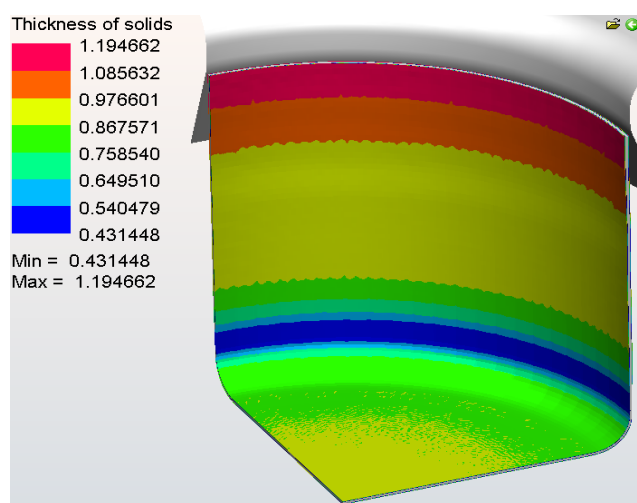


Рисунок 12 – Распределение толщины заготовки в конце первого перехода, мм

Возможным вариантом технологии проведения вытяжки тигля из иридия может быть вариант вытяжки за два перехода с измененной формой матрицы, а также применением дополнительного неподвижного прижима для исключения появления складок на втором переходе вытяжки, что приведет к увеличению числа переходов до трех – между вторым и третьим переходом будет установлен прижим.

Следует отметить, что применение основного неподвижного прижима благоприятно сказывается на сохранении относительно высокой температуры

заготовки в области контакта с ним, и при этом практически исключается вероятность образования складок в ходе процесса вытяжки.

Наиболее оптимальным по числу переходов, величине утонения, температурному режиму в заготовке признан вариант вытяжки за один переход с применением неподвижного прижима и матрицы специальной формы (Рисунок 13). В настоящий момент разработанная технология проходит этап аппаратурного оформления для дальнейшего внедрения в производство на ОАО «ЕЗ ОЦМ».

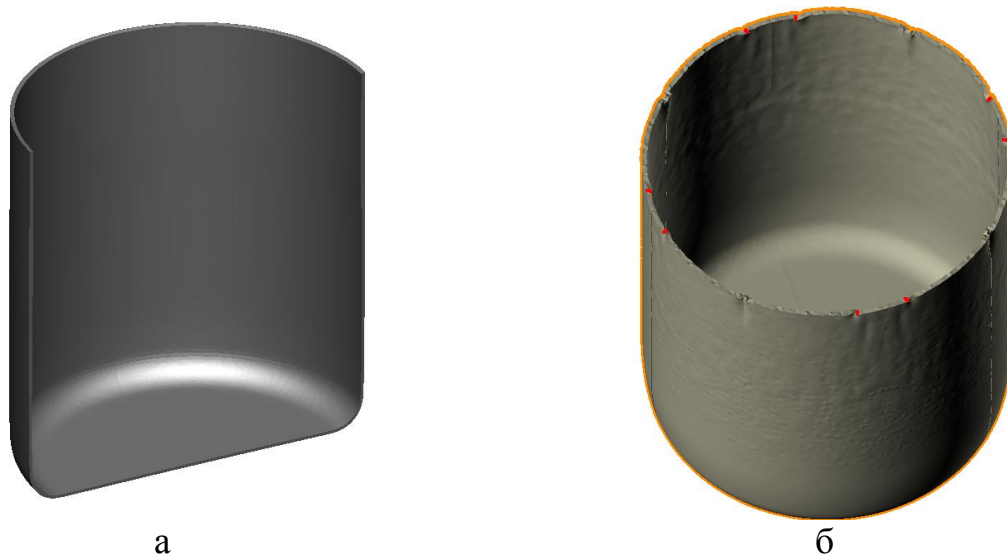


Рисунок 13 – Форма заготовки после перехода вытяжки, полученная в программе PAM-STAMP (а) и QFORM (б)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По итогам выполненного исследования можно заключить, что поставленные цели и задачи выполнены в полном объеме:

1. Использована комбинированная методика проведения холодных испытаний сплавов на основе растяжения проволочных образцов в условиях небольших степеней деформации и измерения условного предела текучести для образцов с высокой степенью нагартовки. Показана возможность получения монотонной зависимости при использовании комбинированного подхода. С помощью этой методики получены значения сопротивления деформации и кривые упрочнения для сплавов ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5, ПлРд-10 и ПлРд-10ДУ, использованные в дальнейшем для выполнения расчетов.

2. Выполнены горячие пластометрические испытания иридия марки И99,9 в диапазоне температур 800...1400°С и скорости деформации 0,2...20 с⁻¹, построена аналитическая зависимость сопротивления деформации иридия от исследуемых термомеханических параметров (степени, скорости и температуры деформации), позволяющая рассчитать уровень сопротивления деформации иридия при любом значении указанных факторов в исследованных пределах. Полученные данные применены для оценки энергосиловых параметров горячей штамповки в проектируемом процессе.

3. Проанализирована стандартная технология обработки заготовки на первой операции штамповки дна стеклоплавильного аппарата, выявлены особенности и дефекты, которые оказывают отрицательное влияние на протекание второй операции и приводят к поломке формообразующих бойков и, соответственно, увеличения срока изготовления и стоимости изделия. Для разработки предложений по улучшению технологии аналитическим методом решена задача холодной штамповки одного канала стеклоплавильного аппарата, построено поле кинематически возможных скоростей, рассчитаны энергосиловые параметры, а также произведен расчет напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. В итоге были выдвинуты предложения по увеличению шага обработки заготовки до значения кратно равному расстоянию между двумя соседними рядами выступов, что позволило уменьшить дефектность заготовки после первой операции штамповки дна стеклоплавильного аппарата. Разработанное предложение внедрено в производственную деятельность ОАО «ЕЗ ОЦМ», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

4. С помощью конечно-элементного моделирования выполнен анализ четырех вариантов технологии изготовления цельноштампованных иридиевых тиглей. В итоге разработана и получена технология вытяжки за один переход с наиболее оптимальным количеством переходов, величиной утонения и температурным режимом, которая принята для внедрения в производство, что подтверждает акт внедрения ООО «ЕЗ ОЦМ – ИНЖИНИРИНГ».

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
Публикации в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Фомин, А.А. Кинематические условия выдавливания пластического слоя через многорядный щелевой штамп / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – №4. – С.14-17. (0,24 п.л./0,12 п.л.).

2. Фомин, А.А. Исследование первой операции штамповки элементов платиновых стеклоплавильных аппаратов / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – №4. – С.37-41. (0,3 п.л./0,15 п.л.).

3. Фомин, А.А. Исследование сопротивления деформации поликристаллического иридия / Ю.Н. Логинов, С.В. Гладковский, А.И. Потапов, А.А. Фомин, Д.Р. Салихьянов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – №4. – С.48-54. *Переводная версия:* Fomin, A.A. Investigation into the Deformation Resistance of Polycrystalline Iridium / Yu. N. Loginov, S. V. Gladkovskii, A. I. Potapov, A. A. Fomin, D. R. Salikhyanov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – V.56, N5. – P.532-539. (0,5 п.л./0,17 п.л.).

Публикации в других изданиях:

1. Фомин, А.А. Анализ формоизменения листовой заготовки из платинородиевого сплава в производстве стеклоплавильных аппаратов / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Тезисы докладов XIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург. – 2012. – С.209-213. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

2. Фомин, А.А. Напряжения пластического течения платинородиевого сплава ПлРд – 10 / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Материалы региональной научно-практической конференции «Наука-Образование-Производство». – Нижний Тагил. – 2013. – С.20-23. (0,18 п.л./0,06 п.л.).

3. Фомин, А.А. Влияние эффекта дисперсного упрочнения платинородиевого сплава на характеристики упрочнения / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Сборник научных трудов «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург. – 2012. – С.51-55. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

4. Фомин, А.А. Анализ видов дефектности после первой операции штамповки дна стеклоплавильного аппарата из платины / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Тезисы докладов XIV Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург. – 2013. – С.169-171. (0,15 п.л./0,05 п.л.).

5. Фомин, А.А. Иридий как перспективный материал в технологиях производства цельноштампованных тиглей / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Тезисы докладов XIV Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург. – 2013. – С.227-231. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

6. Фомин, А.А. Повышение равномерности заполнения многоручьевого штампа после первой операции штамповки дна платинового стеклоплавильного аппарата / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Материалы международной научно-практической конференции «Молодежь и наука». – Нижний Тагил. – 2014. – С.78-83. (0,36 п.л./0,12 п.л.).

7. Фомин, А.А. Влияние пластической деформации на температурные интервалы рекристаллизации платины / А.А. Фомин, Ю.Н. Логинов // Тезисы докладов XV Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург. – 2014. – С.355-356. (0,1 п.л./0,03 п.л.).

Подписано в печать _____ . Формат 60x84 1/16

Бумага 80 г/м². Цифровая печать.

Тираж 100 экз. Заказ № ____

Отпечатано в