

Скоробогатов Александр Олегович

**РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ  
СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в ЗАО «ПРОЧНОСТЬ».

Официальные оппоненты:

Профессор, доктор технических наук	Кохан Лев Соломонович.
Профессор, доктор технических наук	Кривонос Георгий Александрович.
Профессор, доктор технических наук	Смирнов Олег Михайлович.

Ведущая организация:

ОАО «Московский завод по обработке цветных металлов»

Защита состоится 24 ноября 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Учреждении Российской академии наук Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Москва, Ленинский проспект, дом 49).

Отзывы на реферат, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 49, а также по электронной почте по адресу shelest99@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Москва, Ленинский проспект, дом 49).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
профессор, доктор технических наук

А.Е.Шелест

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы:

Постановка и актуальность разработки теории и технологии изготовления тонкостенных оболочек из сплавов алюминия определены низким потреблением алюминиевых сплавов в авиационной, ракетокосмической и других областях техники. В связи с этим, возникает необходимость поиска таких отраслей народного хозяйства, которые могли бы стать альтернативными потребителями алюминиевых сплавов для обеспечения необходимого объема производства и получения прибыли.

Одним из перспективных направлений развития алюминиевой отрасли является производство оболочек с целью дальнейшего их использования в пищевой и парфюмерной промышленности в качестве упаковочного материала. В настоящее время потребление алюминия для производства упаковки под напитки составляет 73 – 89 тысяч тонн в год из усредненного объема переработки деформируемых алюминиевых сплавов в 430 тысяч тонн.

Создание экономически эффективного производства оболочек глубокой вытяжкой возможно либо через дополнительную подготовку производства, либо через качественное изменение всего технологического процесса. Оба пути неразрывно связаны с существующей и хорошо зарекомендовавшей себя в промышленности теорией и технологией операций листовой штамповки. Однако получение тонкостенных оболочек имеет серьезные отличия вследствие малой толщины листового материала (не более 200 мкм), что требует новых подходов к решению поставленной задачи. Известные теории оболочек, основанные на гипотезе Кирхгофа — Лява, позволяют решать только задачи теории упругости и малоприменимы для исследования общих закономерностей стационарной и нестационарной вытяжки.

Разработка теоретических основ и методов экспериментального исследования процессов обработки металлов давлением, применяемых в производстве тонкостенных оболочек позволяет создать предпосылки для дальнейшего совершенствования технологических процессов. Вследствие такого улучшения, можно ожидать существенного снижения объема материально-технических затрат вкладываемых в производство, и в значительной степени уменьшения срока окупаемости.

Таким образом, в сложившихся экономических условиях и с учетом известной консервативности процессов обработки металлов давлением разработка теории и технологии вытяжки тонкостенных оболочек из сплавов алюминия с целью создания нового типа производства является одним из конкурентных путей развития алюминиевой отрасли, что подтверждает актуальность исследований в указанном направлении.

Целью данной работы является разработка теоретических основ технологии изготовления глубокой вытяжкой тонкостенных оболочек различных форм из алюминиевых сплавов для максимального вовлечения в производство имеющегося научно-технического потенциала

алюминиевой отрасли.

Для достижения указанной цели были поставленные и решены следующие задачи:

Анализ состояния производства с обобщением проблем существующих технологий получения заготовки и тонкостенных оболочек.

Разработка теории и создание расчетно-аналитического алгоритма процессов холодной и горячей прокатки и операций вытяжки с учетом изменения структуры, напряженно-деформированного состояния, выбранного варианта технологии и требуемых показателей качества продукции.

Разработка технологических режимов горячей и холодной прокатки лент для обеспечения условий их бездефектного деформирования в операциях вытяжки.

Определение рациональных свойств холоднокатаной ленты, параметров технологии листовой штамповки и оборудования для осуществления операций глубокой вытяжки.

Создание и промышленное освоение нового технологического оборудования и инструмента для изготовления тонкостенных оболочек из сплавов алюминия.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

С использованием аппарата функции комплексного переменного (функции Бергмана) установлены закономерности изменения топологии структуры поликристаллических материалов в процессе вытяжки. Выполнен анализ общего (макроструктура) и частного (микроструктура) протекания процессов деформации поликристаллических материалов в процессах вытяжки.

Разработан аналитический метод исследования процесса вытяжки путем решения вариационных уравнений контакта инструмента и заготовки.

Обоснованы развивающие теорию вытяжки методики определения геометрических, кинематических, деформационных и энергосиловых параметров операций вытяжки на горизонтальном кривошипном прессе с несколькими ползунами.

Предложены анизотропная и изотропная модели поведения тонкой полосы при глубокой вытяжке, а также новая методика и оборудование для определения свойств алюминиевых сплавов идущих на вытяжку тонкостенных оболочек, заключающаяся в комплексной оценке свойств алюминиевых сплавов по данным одновременного испытания на изгиб и растяжение.

Количественно установлено влияние основных технологических параметров операций вытяжки (толщины и анизотропии свойств плоской заготовки, скорости деформации, степени вытяжки, подготовки поверхности заготовки и инструмента) и базовых параметров оборудования при осуществлении операций вытяжки на качество тонкостенных оболочек.

Выявлены закономерности влияния схемы напряженно-деформированного состояния и геометрии очага деформации при формировании днища оболочки. Установлено, что эффект Баушингера способствует бездефектному оформлению сложного фасонного днища оболочки.

Обнаружены и исследованы причины возникновения разрушения матриц, что позволило

разработать и внедрить эффективные технологии их изготовления.

Предложен метод аналитического описания и получено экспериментальное подтверждение определения оптимальных параметров операций вытяжки с учетом контуров текучести и диаграмм упрочнения.

#### **Практическая ценность работы.**

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны и внедрены в практику новые технологические режимы и оборудование для осуществления операций глубокой вытяжки тонкостенных оболочек из алюминиевых сплавов.

Разработан, спроектирован и с 2003 года используется в промышленности (ОАО Дмитровский опытный завод алюминиевой консервной ленты) горизонтальный кривошипный пресс номинальным усилием 12 кН.

Внедрена ресурсосберегающая технология изготовления вытяжкой тонкостенных оболочек из алюминиевых сплавов серий 3000 и 5000, с коэффициентом выхода годного до 98,7%; обеспечено производство оболочек с требуемыми механическими свойствами, микроструктурой и качеством поверхности. Совокупная прибыль от внедрения по п.п. 1 и 2 определена в 2765002 рубля.

Осуществлена реконструкция стана холодной прокатки 1350 ОАО «ДОЗАКЛ».

Разработан и используется в массовом производстве инструментальный магазин с последовательно установленными в нем матрицами, позволяющий осуществлять операцию вытяжки тонкостенных оболочек различного объема, экономическая эффективность от внедрения определена в 3237871 рубль.

Разработана и используется в линии стана холодной прокатки 1350 система оптического выявления дефектов ленты, используемой при вытяжке тонкостенных оболочек; разработан и внедрен каталог дефектов плоского проката отделанного и неотделанного.

**Личный вклад соискателя.** При проведении исследований, результаты которых опубликованы в соавторстве, диссертантом определены идеология, постановка научных задач. Лично разработаны методики расчета, предложены основные идеи технических и технологических решений, выполнен анализ и обобщение лабораторных и промышленных экспериментов. Эксперименты, промышленные испытания и внедрение выполнены под руководством и при личном участии диссертанта.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены:

- на научных семинарах лаборатории пластической деформации металлических материалов Института металлургии и материаловедения им. Байкова РАН, 2005-2007 гг;
- на научных семинарах кафедры «Обработки металлов давлением и металлургического оборудования» Московского государственного вечернего металлургического института, 1997-2007 гг;
- на научно-технических советах Дмитровского опытного завода алюминиевой консервной ленты, 2000-2004 гг;

- на научно-технических советах Самарского металлургического комбината, 2000-2004 гг;
- на научно-технических советах Белокалитвинского металлургического комбината, 2000-2004 гг;
- на международном симпозиуме «Неразрушающий контроль в промышленности», г. Хьюстон, США, 2007 г;
- на семинаре фирмы National Instruments, «Оборудование и методы неразрушающего контроля в металлургии», Хьюстон, США, 2002, 2004 гг;
- на техническом совещании фирм «SEQUA» и «GOLDCO» «Оборудование и технология для производства упаковки», 2006 г;
- на международной научно-технической конференции «Пути реконструкции предприятий металлургической промышленности», Оттава, Канада, 2005 г;
- на международной научно-технической конференции «Новые технологии в производстве упаковки», г. Дублин, Ирландия, 2001 г.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 22 научных статьях.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (175 наименований). Работа содержит 272 страниц машинописного текста, 44 таблицы, 185 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, изложены цель и задачи исследований, освещены научные и практические результаты, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Обоснование перспективности разработки теории и технологии производства тонкостенных оболочек из сплавов алюминия» обобщены материалы, характеризующие основные этапы развития научно-технического прогресса при изготовлении тонкостенных оболочек из алюминиевых сплавов. Приведены современные представления о состоянии теории, технологии, методов исследования и систем качества, характеризующих производство тонкостенных оболочек методами обработки металлов давлением.

Анализ литературы, отражающей развитие научно-технической мысли, мирового и отечественного практического опыта производства тонкостенных оболочек из сплавов алюминия, создания новых производств, позволил укрупнено обозначить ниже следующие группы вопросов, исследованию которых посвящена данная работа. Их решение в ходе выполнения работы способствовало совершенствованию действующей технологии, разработке новых технологических процессов, созданию нового оборудования, повышению технико-экономических показателей цехового производства, линий и агрегатов, определению реконструктивных мероприятий.

**К первой группе** относятся вопросы теории процессов изготовления вытяжкой тонких оболочек. Тот факт, что приложенное усилие пуансона передается через относительно

недеформированное днище заготовки, имеет важное практическое значение. Так, для малых деформаций, величины: показателя деформационного упрочнения, усредненные механические свойства, упрочнение с одновременным уменьшением сечения зон разрушения и деформации не характеризуют способность материала к вытяжке. При этом единственным параметром оценки способности материала к вытяжке является наибольший диаметр заготовки, определение которого возможно в большинстве случаев только экспериментально, а следовательно не всегда экономически оправдано, что делает развитие теории вытяжки тонкостенных оболочек весьма актуальным.

**Ко второй группе** относятся вопросы технологии. Вид обработки, особенности применяемого оборудования, типоразмеры тонкостенных оболочек, производительность и другие влияют на выбор параметров технологии, способы регулирования и контроля технологических параметров, что в конечном итоге определяет их эффективность, а значит и качество продукции при производстве тонкостенных оболочек вытяжкой.

**Третью группу** вопросов составляют вопросы количественных оценок явлений формообразования тонкостенных оболочек, совершенствования методов расчетов, углубленного изучения и повышения достоверности зависимостей, характеризующих процессы прокатки и разновидности операции вытяжки. Получение новых надежных данных о взаимовлиянии условий протекания процессов, операций и работе технологического оборудования необходимо для совершенствования известных способов и методов управления, а также для разработки новых.

Решение **четвертой группы** вопросов основывается на успешном решении задач второй и третьей групп. Это разработка математического обеспечения современных систем управления для работы алгоритмов и программ в реальном времени. Это также вопросы создания математических моделей и компьютерных систем для использования в исследовательских целях, проектировании технологии, выборе состава и количества оборудования.

**Пятую группу** вопросов определяют несоответствия точности изготавливаемой по металлургическим переделам продукции. Возникновение несоответствий возможно даже при высокой культуре производства и степени автоматизации. На современном этапе результаты исследований целесообразно использовать для прогноза появления несоответствий и поиска возможностей их исправления.

**Шестая группа** вопросов связана с совершенствованием имеющегося и созданием нового технологического оборудования на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов и операций ОМД, что позволяет выполнить самые высокие требования технологии производимой продукции. Высокая эффективность комплекса технологического оборудования производства будущего немислима без создания интегрированной автоматизированной системы управления производством, в которой должен быть учтен накопленный научно-технический потенциал.

**Во второй главе** «Разработка теоретических основ процесса вытяжки тонкостенных

оболочек из алюминиевых сплавов» приведены результаты решения задач изменения геометрических параметров микроструктуры поликристаллических материалов в процессе вытяжки, влияния макроскопической нагрузки на деформацию зерна в микро и макроструктурах и исследования формообразования и условий контакта при глубокой вытяжке. Вариационные уравнения исследовательских методов выведены из энергетического равновесия деформируемой системы, которое зависит от напряженности и кривизны границы зерна, величины энергии деформации по каждому зерну, плотности энергии деформации вдоль границы зерна и величины работы внешних сил.

### ВАРИАЦИОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ

Область микроструктуры  $\Omega$  с внешней границей  $\Gamma$ , состоит из зерен, разделенных межзеренной границей  $\Gamma_{gb}$ . Сообщив элементарной ячейке внешнюю нагрузку (рис. 1), последовательно нашли: соотношения между напряженностью поверхности и кривизной межзеренной границы с виртуальной энергией, диссипацию (рассеяние) энергии, величину энергии деформации для каждого зерна, изменение плотности энергии деформации по периметру межзеренной границы, работу внешних сил.

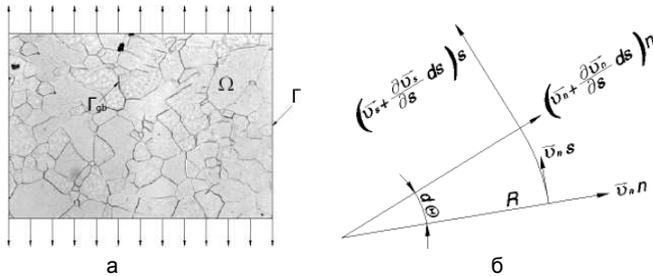


Рис. 1: а - микроструктура элементарной ячейки под действием внешних сил; б - сегмент межзеренной границы

По схеме (см. рис. 1, б) нашли перемещения межзеренной границы, а также нормальную  $\delta \bar{v}_n$  и касательную  $\delta \bar{v}_s$  к межзеренной границе скорости:

$$\delta \bar{v}_s = \left( \bar{v}_s + \frac{\partial \bar{v}_s}{\partial s} ds \right) \times \cos d\Theta - \bar{v}_s + \left( \bar{v}_n + \frac{\partial \bar{v}_n}{\partial s} ds \right) \times \sin d\Theta, \quad (1)$$

где  $d\Theta$  - угол между направлением нормальной скорости и направлением скорости изменения геометрических размеров сечения межзеренной границы.

Местную кривизну межзеренной границы выразили в виде:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{d\Theta}{ds}, \quad (2)$$

где  $R$  - радиус кривизны межзеренной границы.

Величина работы внешних сил, созданная напряженностью сечения элементарной ячейки:

$$\delta \dot{W}_1 = \int_{\Gamma_{gb}} \gamma \delta \dot{\varepsilon}_s ds = \gamma \int_{\Gamma_{gb}} \left( \frac{\partial \delta \bar{v}_s}{\partial s} + \frac{\delta \bar{v}_n}{R} \right) ds, \quad (3)$$

где  $\gamma$  - поверхностное натяжение.

Величину диссипации энергии получили из значения вязкостного сопротивления перемещению межзеренной границы во время вытяжки:

$$\delta \dot{W}_2 = \int_{\Gamma_{gb}} f_n \delta \bar{v}_n ds, \quad (4)$$

где  $f_n$  - внешняя сила, соотносящаяся с нормальной скоростью через кинетический закон:

$$\bar{v}_n = \mu f_n, \quad (5)$$

где  $\mu$  - подвижность межзеренной границы.

Соответствующее нормальной скорости  $\delta \bar{v}_n$  перемещение межзеренной границы выражение для виртуальной энергии имеет вид:

$$\delta \dot{W}_3 = \int_{\Gamma_{gb}} \frac{1}{2} (\sigma^+ : \varepsilon^+ - \sigma^- : \varepsilon^-) \delta \bar{v}_n d\Gamma, \quad (6)$$

где  $\sigma^+$ ,  $\varepsilon^+$  - напряжение и деформация зерна площадью  $\delta \bar{v}_n d\Gamma$  в единицу времени;

$\sigma^-$ ,  $\varepsilon^-$  - напряжение и деформация зерна за пределами межзеренной границы.

Анизотропный закон ползучести для каждого зерна в структуре:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}, \quad (7)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  - скорость деформации,  $\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $v_i$  - скорость материала зерна.

Исходное вариационное уравнение (свободная энергия Гиббса) имеет вид:

$$\int_{\Omega} \delta \dot{\varepsilon} : \sigma d\Omega + \left( \int_{\Gamma_{gb}} \gamma \left( \frac{\partial \delta \bar{v}_s}{\partial s} + \frac{\delta \bar{v}_n}{R} \right) ds + \int_{\Gamma_{gb}} \frac{\delta \bar{v}_n}{\mu} \bar{v}_n ds \right) + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{gb}} (\sigma^+ : \varepsilon^+ - \sigma^- : \varepsilon^-) \delta \bar{v}_n d\Gamma - \int_{\Gamma_h} \delta v \times h d\Gamma - \int_{\Omega} \delta v \times b d\Omega = 0 \quad (8)$$

В ответ на приложение внешней нагрузки структура перемещается и деформируется, при этом рост амплитуды перемещения зависит от минимизации совокупного значения свободной

энергии Гиббса относительно работы всех внешних сил приложенных к межзеренной границе.

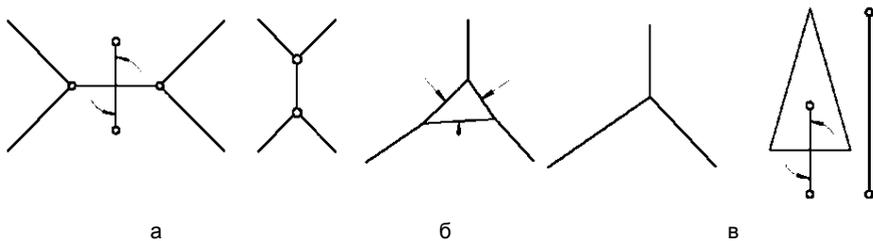


Рис. 2. Топологические преобразования межзеренной границы: а –  $T_1$  (коммутация межзеренных границ по ближайшим двум тройным точкам); б –  $T_2$  (сжатие трехстороннего зерна в точку); в –  $T_3$  (аппроксимация зерен единой границей, для случая геометрической неопределенности преобразования  $T_1$ )

В процессе перемещения межзеренная граница испытывает следующие топологические изменения (рис. 2), причем правила топологической реконструкции перемещения межзеренной границы подчиняются следующему уравнению Эйлера:

$$N + V - E = 1, \quad (9)$$

где  $N$  - число зерен в исследуемой структуре;

$V$  - количество сходящихся точек (сходящихся вершин межзеренных границ);

$E$  - количество межзеренных границ.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДЕФОРМАЦИЮ ЗЕРНА В МИКРО И МАКРОСТРУКТУРАХ

На рис. 3, показана иерархия структуры материала для металлографического исследования.

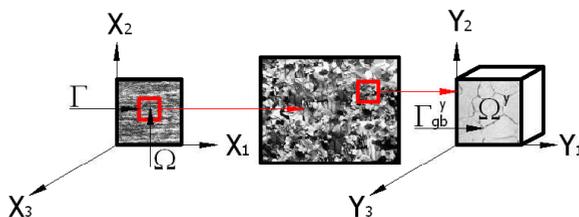


Рис. 3. Иерархическая структура металлографического анализа

Если  $x$  - координата в макроструктуре, тогда отображение элементарной ячейки область  $\Omega$  с границей  $\Gamma$  на микроструктуру обозначим элементарной ячейкой область  $\Omega^y$  с границей  $\Gamma^y$  и координатой  $y$ . Отношение координат макро и микроструктуры обозначим через коэффициент  $\lambda$ :

$$dy_i = \frac{dx_i}{\lambda}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  - наименьшее вещественное число.

Обозначив силу поверхностного сцепления, действующую по границе  $\Gamma_h$  элементарной ячейки на поверхности микроструктуры через  $h$ , а межзеренную границу как  $\Gamma_{gb}$ . Тогда будем иметь вариационные уравнения, выражающие изменение геометрии зерна после деформации для макроструктуры:

$$\begin{aligned} \delta\Pi(v, \bar{v}) &= \delta\Pi_e(v) + \delta\Pi_{gb}(v, \bar{v}) = 0, \\ \delta\Pi_e(v) &= \int_{\Omega} \frac{1}{2} \delta(\sigma : \dot{\varepsilon}) d\Omega - \int_{\Gamma_h} \delta v \times h d\Gamma - \int_{\Omega} \delta v \times b d\Omega, \\ \delta\Pi_{gb}(v, \bar{v}) &= \int_{\Gamma_{gb}} \frac{1}{2} (\sigma^+ : \varepsilon^+ - \sigma^- : \varepsilon^-) \delta \bar{v}_n d\Gamma + \int_{\Gamma_{gb}} \gamma \left( \frac{\partial \delta \bar{v}_s}{\partial s} + \frac{\delta \bar{v}_n}{R} \right) d\Gamma + \int_{\Gamma_{gb}} \frac{\delta \bar{v}_n}{\mu} \bar{v}_n d\Gamma \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\delta\Pi_e$  - энергия деформации зерна,  $\delta\Pi_{gb}$  - движущая сила, действующая на границе,  $v$  - скорость перемещения материала зерна,  $\bar{v}$  - скорость перемещения границы,  $v_n$  - нормальная скорость, направленная от центра кривизны границы,  $v_s$  - тангенциальная скорость, направленная вдоль границы,  $s$  - координата вдоль границы,  $\gamma$  - поверхностное натяжение (границная энергия на единицу площади),  $R$  - радиус кривизны поверхности,  $\mu$  - подвижность (направление возможного перемещения) границы,  $h$  - поверхностное сцепление по границе  $\Gamma_h$ ,  $b$  - массовая сила,  $\sigma^+$ ,  $\varepsilon^+$  - напряжение и деформация зерна в области  $\delta \bar{v}_n d\Gamma$ , (зерно А),  $\sigma^-$ ,  $\varepsilon^-$  - напряжение и деформация зерна, за пределами межзеренной границы (зерно Б), (рис. 4).

Отношение между напряжением и деформацией дадим в виде анизотропного закона ползучести:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}. \quad (12)$$

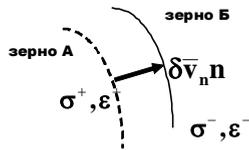


Рис. 4. Изменение энергии деформации после перемещения межзеренной границы

Найденные уравнения деформации зерен и соответствующих им перемещений межзеренных границ на поверхности макро и микроструктур суммируем в табл. 1.

При помощи этих уравнений был исследован алюминий-магний-свинец сплав AA 3104 со следующими параметрами: сечение элементарной ячейки  $1.0^{-6} \times 1.0^{-6}$  м, подвижность -  $\mu=0,08$  м/Н×с, поверхностное натяжение -  $\gamma_b=0,37$  Н/м, модуль Юнга -  $E_1=E_2=0,69 \times 10^5$  МН/м<sup>2</sup>, поверхностное сцепление по границе -  $h=7,42$  Н/м<sup>2</sup>. Процесс деформации - холодная прокатка. Уравнения деформации зерна и перемещений межзеренной границы - эллиптические. Построение

Наименование	Результирующие уравнения
Скорость деформации зерна	<ul style="list-style-type: none"> <li>• уравнение связи:                     <math display="block">v_k^{[1]} = \alpha_{kmn}(y) \dot{\varepsilon}_{mn}^{[0]}(x);</math> <math display="block">\int_{\Omega^y} \beta_{imn,j} C_{ijkl} \eta_{klmn} d\Omega = - \int_{\Omega^y} \beta_{imn,j} C_{ijmn} d\Omega;</math> <math display="block">\eta_{klmn} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \alpha_{imn}}{\partial y_j} + \frac{\partial \alpha_{jmn}}{\partial y_i} \right).</math> </li> <li>• уравнение макроструктуры:                     <math display="block">\int_{\Omega^y} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \bar{C}_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}^{[0]} d\Omega - \int_{\Gamma_h^y} w_i h_i d\Gamma - \int_{\Omega^y} w_i h_i d\Gamma = 0;</math> <math display="block">\bar{C}_{ijmn} = \frac{1}{S} \int_{\Omega^y} C_{ijkl} (I_{klmn} + \eta_{klmn}) d\Omega.</math> </li> </ul>
Скорость перемещения межзеренной границы	<ul style="list-style-type: none"> <li>• уравнение макроструктуры:                     <math display="block">\int_{\Omega^y} \frac{1}{2} [\varepsilon_{ij}^{+[0]} \sigma_{ij}^{+[0]} - \varepsilon_{ij}^{-[0]} \sigma_{ij}^{-[0]}] \delta \bar{v}_n^{[0]} d\Gamma - \int_{\Gamma_{gb}^y} \left( \frac{\partial \delta \bar{v}_s^{[0]}}{\partial s} + \frac{\delta \bar{v}_n^{[0]}}{R} \right) d\Gamma - \int_{\Omega^y} w_i h_i d\Gamma = 0.</math> </li> <li>• уравнение микроструктуры:                     <math display="block">\int_{\Omega^y} \frac{1}{2} [\varepsilon_{ij}^{+[0]} \sigma_{ij}^{+[1]} + \varepsilon_{ij}^{+[1]} \sigma_{ij}^{+[0]} - \varepsilon_{ij}^{-[0]} \sigma_{ij}^{-[1]} - \varepsilon_{ij}^{-[1]} \sigma_{ij}^{-[0]}] \delta \bar{v}_n^{[1]} d\Gamma + \int_{\Gamma_{gb}^y} \frac{\delta \bar{v}_n^{[1]}}{\mu} \bar{v}_n^{[1]} d\Gamma = 0.</math> </li> </ul>

Суммируя полученные результаты нашли, что для зерна менее чем с шестью гранями наблюдается уменьшение размеров сечения, а временами и вовсе полное его исчезновение, в то время как для зерна с более чем шестью гранями наблюдали растяжение сечения.

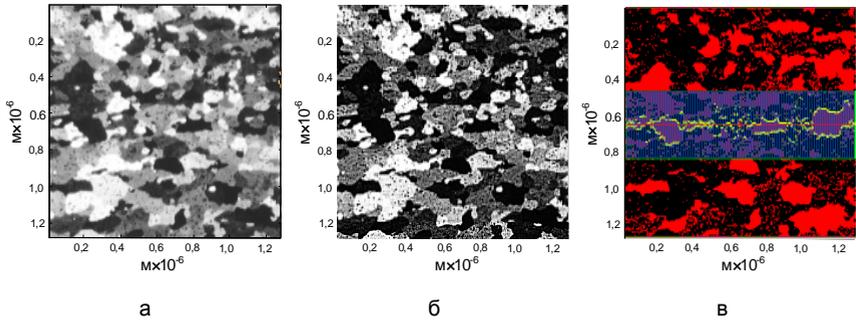


Рис. 5. Положение межзеренных границ в алюминиевом сплаве 3104 после деформации: а – результаты вычисления; б – морфологическая обработка; в – локальное построение топологии границы

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И УСЛОВИЙ КОНТАКТА ПРИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

В основу исследования условий трения на контакте заготовки и инструмента положили закон трения Кулона и обозначили: поверхность заготовки как  $\Gamma_X^S$ , а поверхность инструмента как  $\Gamma_X^M$ , (см. рис. 6).

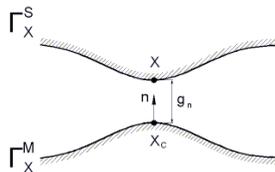


Рис. 6. Геометрическая интерпретация контакта двух поверхностей

Зазор  $g_n$ , для каждой точки  $x \in \Gamma_X^S$  определили из соотношения:

$$g_n = (x - x_c) n, \quad (13)$$

где  $x_c$  - проекция ближайшей точки  $x$  на  $\Gamma_X^M$ , или  $\|x - x_c\| = \min \left\{ \|x - x^*\| : x^* \in \Gamma_X^M \right\}$ ;

$n$  - единичный вектор нормали от поверхности  $\Gamma_X^M$  в точке  $x_c$ . Тогда, закон Кулона для двух поверхностей находящихся в контакте:

$$\begin{cases} \text{если } |h_t| \leq \mu |h_n|, \text{ то } g_t = 0 \text{ - прилипание,} \\ \text{иначе, } |h_t| = \mu |h_n| \text{ - скольжение} \end{cases}, \quad (14)$$

где  $h_t$  - тангенциальная сила, направленная в противоположную сторону относительно перемещения;

$\mu$  - коэффициент трения;

$g_t$  - приращение модуля тангенциальных перемещений за счет увеличения величины нагрузки.

Для определения условий контакта двух поверхностей использовали формулу Лагранжа:

$$\delta\Pi(u) = \int_{\Gamma_C} (\lambda_n \delta g_n + \lambda_t \delta g_t) d\Gamma = 0, \quad \Gamma_C^S = \Gamma_X^S \cap \Gamma_X^M, \quad (15)$$

где  $\delta\Pi(u)$  - действительная работа;

$$\lambda_n = -\omega_n g_n; \quad (16)$$

$$\lambda_t = \begin{cases} \text{если } -\omega_t g_t, & \text{то } |\omega_t g_t| \leq |\mu \lambda_n| - \text{прилипание} \\ \text{иначе,} & -\mu \lambda_n \operatorname{sgn}(g_t) - \text{скольжение} \end{cases}, \quad (17)$$

где  $\omega_n$  и  $\omega_t$  - фактические значения коэффициента трения, а уравнение (16) – исходная форма закона Кулона.

Контакт заготовки и инструмента исследовали, выполнив декомпозицию поверхностей в виде двух множеств точек, (рис. 7).

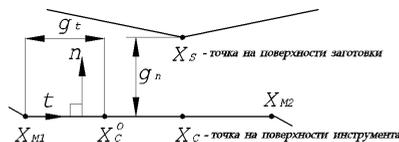


Рис. 7. Дискретизация поверхностей находящихся в контакте

Результаты теоретических исследований применили для вычисления усилия вытяжки оболочки в четырех последовательно установленных матрицах, (см. рис. 8) для следующих констант: толщина стенки  $h=0,221$  мм и диаметр чашки  $C_d=92,075$  мм, диаметр пуансона  $R_p=66,12$  мм, радиус скругления заходного очка матрицы  $R_d=0,15$  мм. Механические свойства материала: модуль Юнга 69 ГПа, коэффициент Пуассона 0,37, константа изотропного упрочнения  $R(\epsilon^p)=589(10^{-4}+\epsilon^p)^{0,216}$  МПа. Значение коэффициента трения приняли равным 0,02. Количество итераций в пределах рабочего хода пуансона, равного 115.62 мм, ограничили 50.

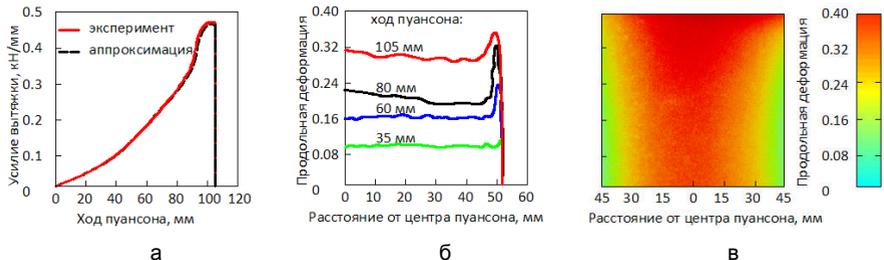


Рис. 8. Распределение при вытяжке цилиндрической тонкостенной оболочки: а - усилий; б - величин истинных продольных деформаций; в - эквивалентной деформации

Для выяснения погрешности вычислений на график (рис. 8, а) наложили величины истинных усилий полученных с датчиков, установленных на прессе. Из результатов видно, что изменение вычисленных величин усилия вытяжки и изменение экспериментальных величин усилия вытяжки имеют очень хорошую сходимость. На рис. 8 б построены графики продольной деформации оболочки в зависимости от длины хода пуансона в точку заднего выстоя. Результат суммарного распределения деформации по длине симметричной оболочки показан на рис. 8 в.

***В третьей главе*** «Исследование технологических процессов изготовления тонкостенной оболочки» исследовано напряженно-деформированного состояния металла заготовки при приложении циклической нагрузки. При этом в части определения упрочнения изотропного металла для случая существования подобия кривых прямой и реверсивной нагрузок модель дополнена стандартными испытаниями на растяжение. Введенная в работе нелинейная кинематическая модель упрочнения анизотропного металла позволила повысить достоверность результатов.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССАХ ПРОКАТКИ И ВЫТЯЖКИ**

Рассмотрели кинематическую модель упрочнения анизотропного материала и сравнили предлагаемую модель с предыдущими исследованиями по трем критериям, определяющим устойчивость процесса деформирования, (табл. 2).

Таблица 2

Устойчивость процессов листовой обработки металлов давлением

Модель исследуемого материала	Уменьшение предела упругости во время реверсивного деформирования	Циклическая нелинейность напряженно-деформационного цикла	Долговременное разупрочнение
Линейная модель кинематического упрочнения	Да	Нет	Да
Нелинейная модель кинематического упрочнения	Да	Да	Нет
Кинематическая модель упрочнения анизотропного материала	Да	Да	Да

Достоверность полученных результатов проверили численными экспериментами и испытаниями на растяжение-сжатие алюминиевых сплавов АА 3104 и АА 6206, идущих на вытяжку цилиндрических оболочек (рис. 9).

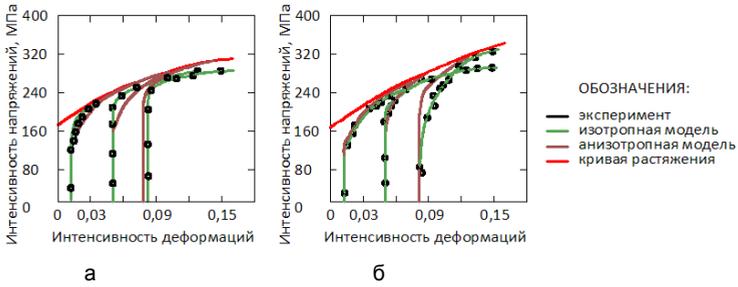


Рис. 9. Сравнение кривых изотропной и анизотропной моделей алюминиевых сплавов: а - АА 3104; б - АА 6206 с экспериментальной кривой, построенной в ходе проведения испытаний на растяжение-сжатие

Из найденных данных видно, что вычисление по методике изотропной модели дает заниженные значения предела текучести материала при приложении реверсивной нагрузки, (рис. 9, а и б). Расчетные величины полученные по анизотропной модели упрочнения хорошо согласуются с экспериментальными данными, включая величину постоянного смещения.

Исходные уравнения анизотропной модели имеют вид:

$$r_n^\sigma = r_0^\sigma + \dot{\sigma}^0 + \dot{\lambda}Ca + \Delta\lambda C \left( \frac{\partial a}{\partial \sigma} \dot{\sigma} \right) - \Delta\lambda C \left( \frac{\partial a}{\partial \sigma} \dot{\alpha} \right) = 0; \quad (18)$$

$$r_n^\alpha = r_0^\alpha + \dot{\alpha} - \frac{A_k}{\sigma^0} \dot{\lambda}(\sigma - \alpha) + \frac{A_k}{(\sigma^0)^2} \Delta\lambda(\sigma - \alpha)\dot{\sigma}^0 - \frac{A_k}{\sigma^0} \Delta\lambda(\dot{\sigma} - \dot{\alpha}) = 0; \quad (19)$$

$$f_n = f_0 + a^T \dot{\sigma} + a^T \dot{\alpha} - A_1 \dot{\lambda}, \quad (20)$$

где  $n, 0$  - подстрочные индексы, обозначающие последующее и предыдущее значения напряжений,  $\dot{\sigma}$  - измененное значение напряжения относительно  $\sigma$ ,  $\dot{\lambda}$  - измененное значение степени пластической деформации относительно  $\Delta\lambda$ .

Используя исходные уравнения, определили истинное напряжение:

$$\dot{\sigma} = \left( C - \frac{R^2 a a^T}{a^T R a + A_1 + A_2} \right) \dot{\varepsilon} = C^{ep} \dot{\varepsilon} \quad (21)$$

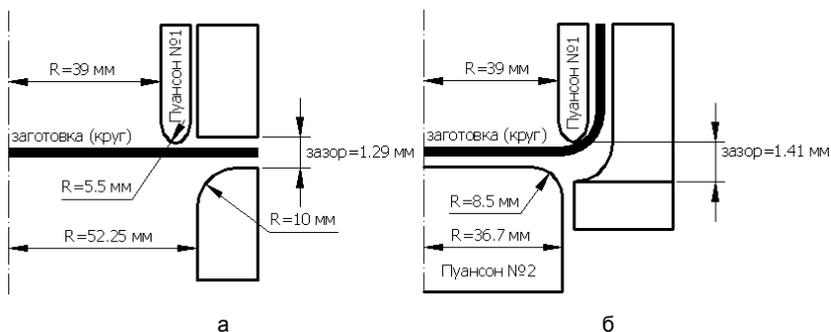


Рис. 10. Схема реверсивной вытяжки с прижимом цилиндрической полый чашки: а - первый переход;  
б - второй переход

На рис. 10 показана схема экспериментальной вытяжки с прижимом. Во время эксперимента зазор повышали вплоть до образования в процессе вытяжки одного из дефектов: складкообразования или разрушения заготовки чашки.

Эксперимент продублировали численным моделированием с использованием данных анизотропной модели. На рис. 11 показаны результаты вытяжки цилиндрической оболочки на различных стадиях деформирования, а на рис. 12 результаты математического моделирования. Как видно, результаты эксперимента и математического моделирования во многом совпадают.



Рис. 11. Вытяжка оболочки из сплава АА 3104: а - первый переход; б - второй переход при длине хода пуансона 20 мм; в - изделие в конце второго перехода

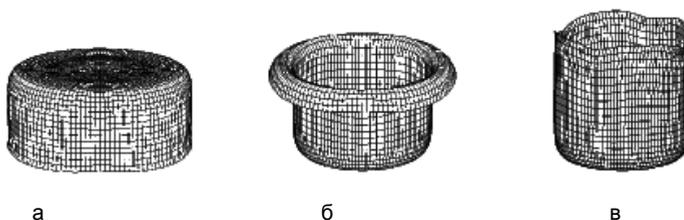


Рис. 12. Результат моделирования вытяжки оболочки из сплава АА 3104: а - первый переход; б - второй переход при длине хода пуансона 25 мм; в - изделие в конце второго перехода

На рис. 13 проведено сравнение (по переходам) толщины заготовки, измеренной вдоль линии, проведенной под углом  $45^{\circ}$  к линии направления прокатки. Вследствие доминирования при деформации компоненты удлинения, во всех трех случаях (изотропная, анизотропная модели и значения эксперимента) получены достаточно схожие результаты распределения толщины.

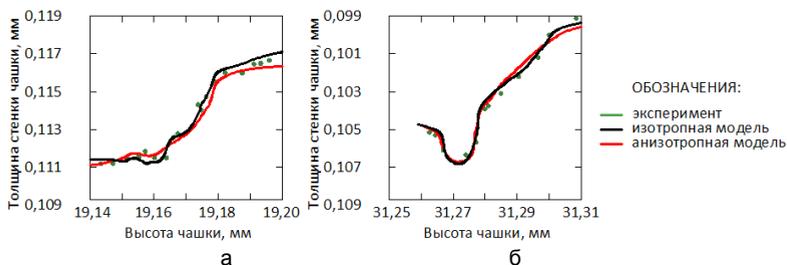


Рис. 13. Распределение толщины заготовки из сплава AA 3104 вдоль линии, проведенной под углом  $45^{\circ}$  к линии направления прокатки в процессе вытяжки: а - первый переход; б - второй переход

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

На рис. 14 показана схема испытательного стенда, для осуществления эксперимента на трехточечный перегиб.

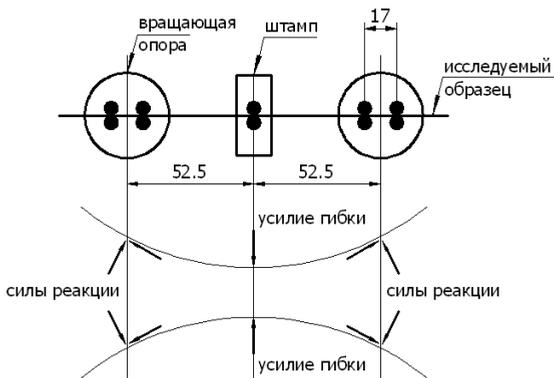


Рис. 14. Схема испытательного стенда для осуществления эксперимента на перегиб по трем точкам

Для испытаний по указанному методу подготовили 6 образцов, и после калибровки приборной части провели серию экспериментов, при этом погрешность измеренных величин в сигналах были: усилие гибки – 2%, угол вращения – 1.5%, степень деформации – 3%.

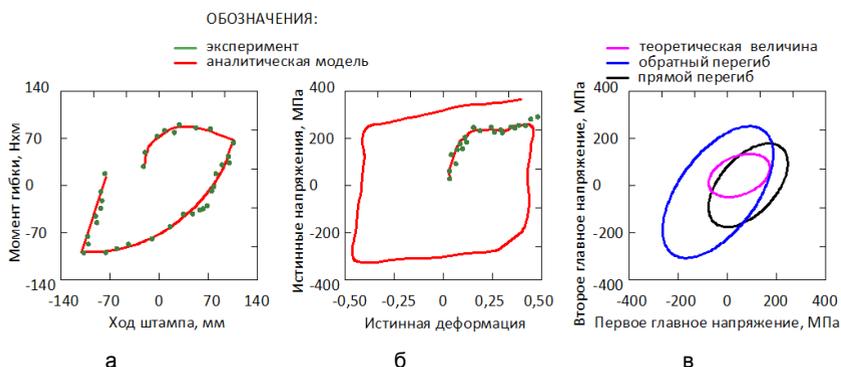


Рис. 15. Сравнение результатов моделирования с экспериментами: а - перегиб по трем точкам; б - зависимость деформаций от напряжений; в - распределение главных напряжений на предельной поверхности пластической деформации при проведении испытаний на перегиб

Таблица 3

#### Параметрическое сравнение алюминиево-магниевого сплава АА 3104

Экспериментальный параметр	Q, МПа	b, мм	C, МПа	$\gamma$ , град	r, мм	$\sigma_0$ , МПа	E, ГПа
Гибка	143,6	7,151	70,43	119,49	1	155,80	65,47
Растяжение	Нет	нет	нет	нет	0,75	170,31	68,24

Сравнение расчетных величин с экспериментом представлено на рис. 15. Найденные параметры для сплава АА 3104 свели в табл. 3. Зависимость деформаций от напряжений и график растягивающих напряжений показаны на рис. 16, а распространение напряжений на предельной поверхности пластической деформации - на рис. 17.

### АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА, ПРИМЕНЯЕМОГО В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОРОБЧАТЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

На рис. 16 показана схема вытяжки с прижимом. На схеме отмечены: степень деформации DR (отношение диаметра  $D_0$  листовой заготовки к диаметру  $D_p$  пуансона), зазор c между пуансоном и матрицей, радиусы скругления пуансона  $R_p$  и матрицы  $R_d$ , толщина  $t_0$  листа, давление  $p_h$  прижима и скорость  $v_p$  пуансона.

По результатам математического моделирования (рис. 17 а, б) сделан вывод о том, что при скорости деформации 4 мм/с, первое главное напряжение возникает в процессе втягивания заготовки в полость матрицы на поверхности скругления матрицы по линии наибольшей кривизны, на 7,24 секунде. Третье главное напряжение возникает на 6,01 секунде в области, расположенной немного выше линии скругления заходного очка матрицы. Причем, абсолютная величина  $(\sigma_3)_{\max}$  примерно в 5 раз выше величины  $(\sigma_1)_{\max}$ , а направление  $(\sigma_1)_{\max}$  совпадает с периферическим.

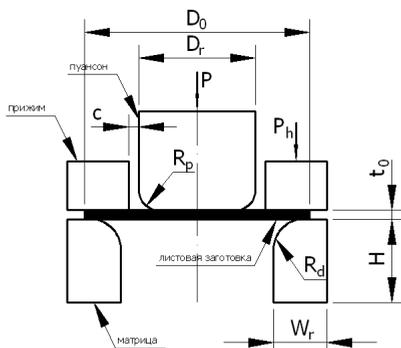


Рис. 16. Схема вытяжки с прижимом

Разрушение матриц в процессе вытяжки тонкостенной оболочки изучали на примере тонкостенного цилиндра, нагруженного внутренним давлением. При вытяжке было установлено, что вначале процесса наблюдается рост усилия вплоть до достижения им пикового значения, после чего его величина начинает снижаться, пока не достигает значения, при котором наступает разрыв матрицы.

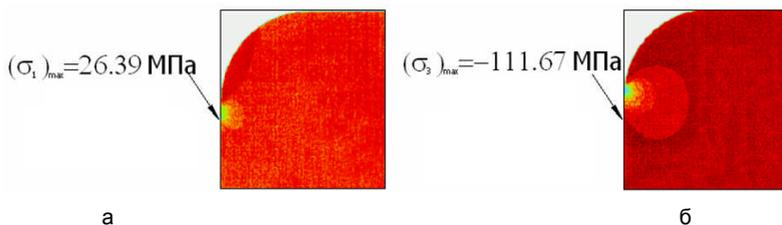


Рис. 17. Распределение главных напряжений в матрице, используемой в процессе вытяжки цилиндрической полый чашки: а - распределение  $(\sigma_1)_{\max}$  (7,24 с); б - распределение  $(\sigma_3)_{\max}$  (6,01 с)

На рис. 18 показано положение системы пуансон - заготовка - матрица в момент разрушения матрицы при максимальной величине усилия вытяжки. Было установлено, что величина усилия разрушения матрицы и максимальное усилие вытяжки тонкостенной оболочки не совпадают.

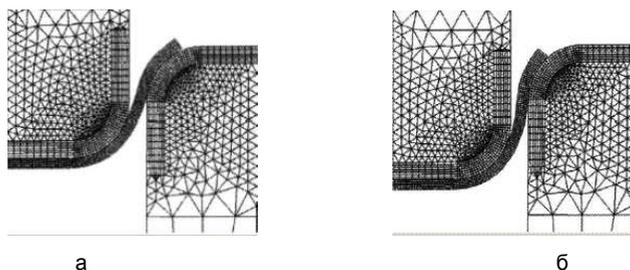
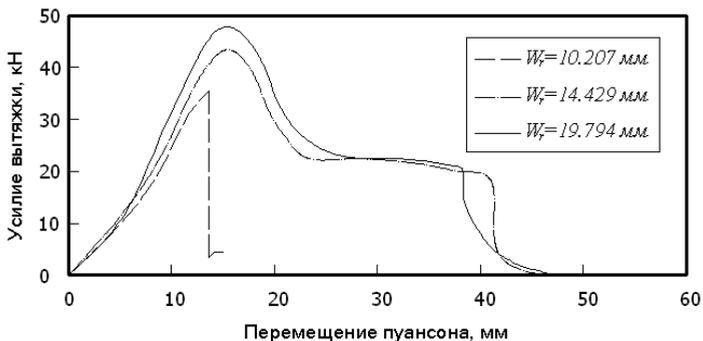


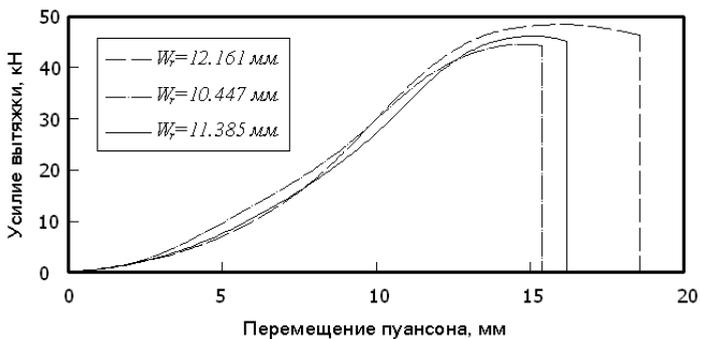
Рис. 18. Положение системы пуансон - заготовка – матрица: а - в момент достижения максимального усилия вытяжки; б - в момент разрушения матрицы

С целью исследования влияния зазора между матрицей и пуансоном и толщины стенки матрицы на процесс разрушения матриц изготовили матрицы разных размеров. При этом значения зазора между матрицей и пуансоном и толщины стенки матрицы установили экспериментально.

По кривым (рис. 19, а) видно, что величина максимального усилия возрастает с ростом толщины стенки матрицы. Была найдена толщина стенки матрицы  $W_r=10,207$  мм, при которой единожды (при осуществлении трех попыток) произошло разрушение матрицы, из этого был сделан вывод о существовании критической величины стенки матрицы, ниже которой разрыв будет происходить при любой толщине стенки матрицы.



а



б

Рис. 19. Влияние толщины стенки матрицы на процесс вытяжки оболочек: а -  $(1,04t_0)$  и б -  $(1,10t_0)$

На рис. 20 показаны три вида разрушения матриц имевших место в процессе вытяжки тонкостенной оболочки. Установлено, что с уменьшением толщины стенки матрицы, количество трещин возрастает. Малая толщина стенки матрицы, является причиной снижения величины сопротивления растягивающим напряжениям. Таким образом, матрицы с небольшой толщиной стенки будут иметь склонность к трещинообразованию, и дальнейшему их быстрому распространению.

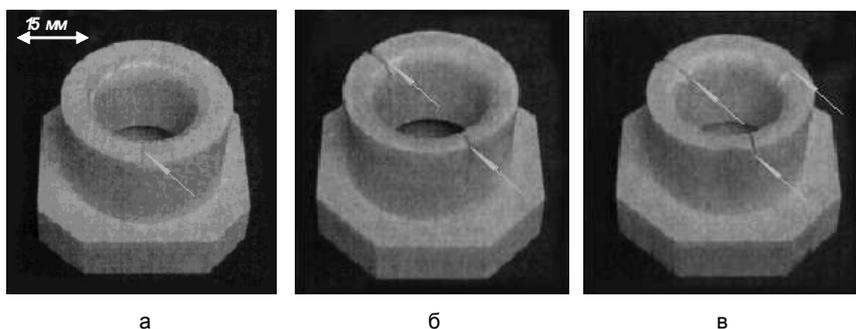


Рис. 20. Виды разрушения матриц: а - образование одной трещины; б - образование двух трещин; в - образование трех трещин

Развитие износа матриц показано на рис. 21. На фотографиях видно, что вследствие складкообразования имеет место износ, что подтверждается состоянием контактной поверхности матриц. Образование складок происходит в момент контакта материала заготовки с поверхностью заходного очка матрицы. Степень складкообразования увеличивается, с увеличением числа операций вытяжки.

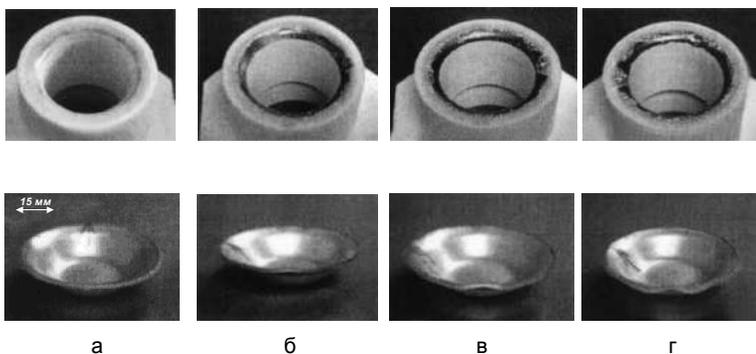


Рис. 21. Износ матриц после вытяжки: а - 1006 заготовок; б - 1035 заготовок; в - 1509 заготовок; г - 1787 заготовок

Исследование пластической деформации пуансона и возникающего вследствие этого эффекта также представляют значительный интерес. Износ пуансонов показан на рис. 22. Развитие деформации представляется в виде рельефа, возникающего на рабочем конце пуансона от действия периодически повторяющейся сжимающей нагрузки. Ширина образованного пластической деформацией рельефного кольца в радиальном направлении для указанных трех случаев была: 0,304 мм - 1-ый пуансон, 0,176 мм - 2-ой пуансон, и 0,012 мм - 3-ий пуансон.

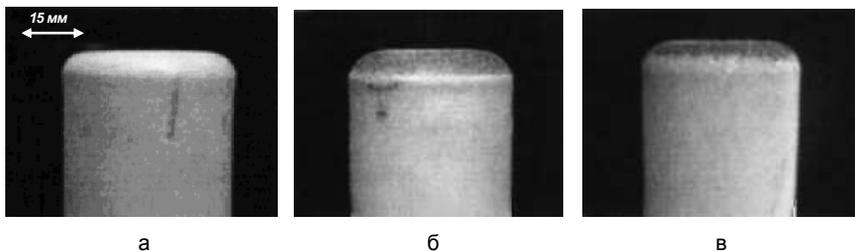


Рис. 22. Пластическая деформация пуансона: а - с радиусом скругления 1,143 мм (после вытяжки 974 заготовок); б - с радиусом скругления 1,524 мм (после вытяжки 1113 заготовок); в - с радиусом скругления 1,524 мм (после вытяжки 1674 заготовок)

На рис. 23 показано распространение нормальных максимальных компонент напряжений (при сжатии) вдоль радиуса скругления рабочего конца пуансона. Из графика видно, что при снижении вдвое радиуса скругления матрицы, происходит почти удвоение величины нормальных напряжений. Становится понятным, почему при меньших значениях радиуса скругления рабочего конца пуансона время до возникновения пластической деформации пуансона снижается.

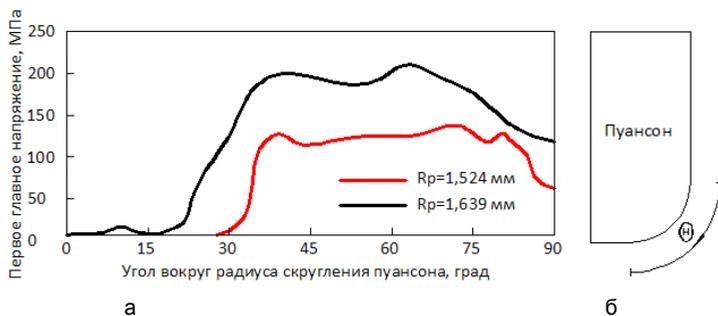


Рис. 23. Эффект от воздействия радиуса скругления рабочего конца матрицы на величину нормальных напряжений: а - распределение нормальных напряжений; б – величина радиуса скругления рабочего конца пуансона

**В четвертой главе** «Исследование и промышленное опробование технологий производства тонкостенной оболочки из алюминиевых сплавов», представлены результаты разработки и промышленного опробования технологии изготовления полых оболочек из алюминиевых сплавов 3000 серии. Подробно рассмотрены технологии массового производства - получения литой заготовки, прокатки из неё лент и последующей вытяжки полых оболочек с учетом используемого инструмента.

## ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕНТ ИЗ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ

Прокат, имеющий направленную структуру шероховатости поверхности, обладает свойством удерживать смазку, что является необходимым условием при вытяжке с утонением стенки цилиндрической тонкостенной оболочки. Так же имеются и дополнительные преимущества, такие как низкий износ инструмента, высокая штампуемость и выход годного.

На рис. 24, показана схема расположения кратеров в процессе профилирования рабочего вала.

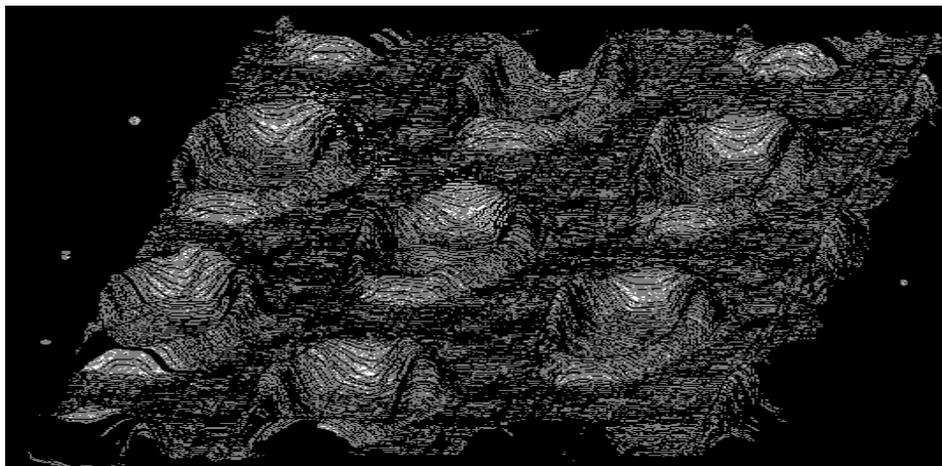
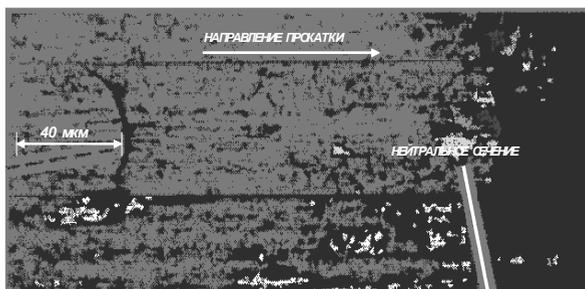


Рис. 24. Топография бочки рабочего вала в гексагональном направлении, сечение  $400 \times 400$  мкм

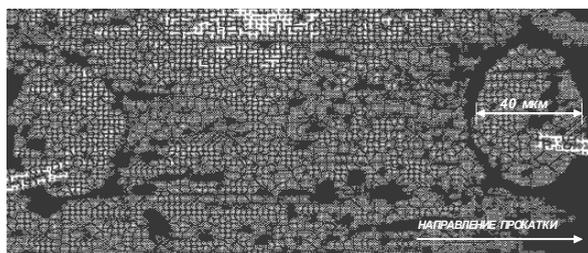
С применением электронно-лучевого профилографа получена следующая текстура поверхности: внешний радиус кратера - 76,2 мкм, ширина пояса кратера - 25,4 мкм, внутренний радиус кратера - 50,8 мкм, межсоевое расстояние - 203 мкм, площадь края кратера -  $10,1 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup> и площадь базового параллелограмма  $35,6 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>. Доля площади параллелограмма закрытой краем насечки равнялся 28 %.

По полученным значениям вычислено количество насечек  $N=146$  в пределах выбранной прямоугольной области длиной 0,025 метра (по оси вала и в направлении прокатки) и шириной 204 мкм (предварительно вычисленная ширина контакта в направлении прокатки по области контакта рабочего и опорного валков).

Элементы насеченной поверхности, показанные на рис. 25, - результат окончательной доводки вала. Продукция, полученная в процессе прокатки на таких валках, имеет блестящую поверхность без матовых включений.

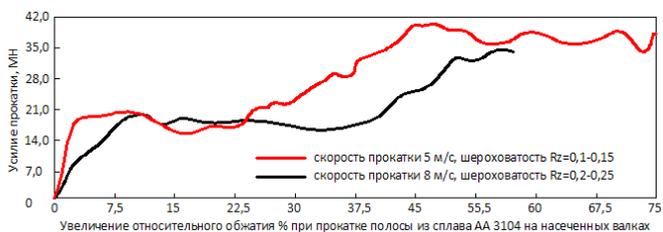


а

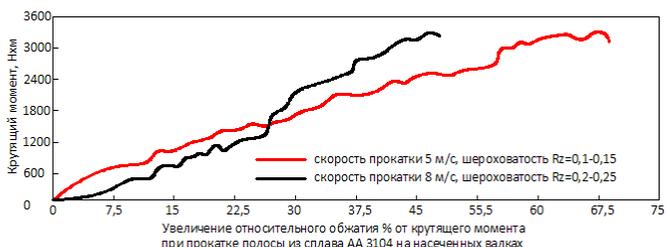


б

Рис. 25. Микрофотографии формирования профиля: а - поверхность полосы прокатанной на насеченных рабочих валках,  $\times 425$ , б - при проходе заготовкой нейтрального сечения,  $\times 425$



а



б

Рис. 26: а - график изменения усилия прокатки; б - график, изменения момента прокатки от величины относительного обжатия, в процессе прокатки в валках с насечкой

Прокатка на насеченных рабочих валках, позволяет вести процесс с высокими степенями обжатий от 35% до 60%. Сравнение энергосиловых параметров от величины относительного обжатия при прокатке показаны на рис. 26 а и б.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

В рамках эксперимента определены оптимальные соотношения  $dP_p/dP$  (отношение приращения усилия на опорных валках к приращению усилия прокатки), необходимые для компенсации искажений профиля и толщины прокатываемой полосы, жесткости прокатываемой полосы и клетки, величины и характера некомпенсируемой поперечной и продольной разнотолщинности.

С целью упрощения эксперимента и экономии расходуемого на эксперимент металла применили серии карточек. Карточки очерчивались на полосе шириной 1600 мм, (что соответствует максимальной проектной ширине прокатываемой полосы) и длиной 800 мм. Материал карточек алюминиевый сплав АА 3104. Разметка карточек приведена на рис. 27.

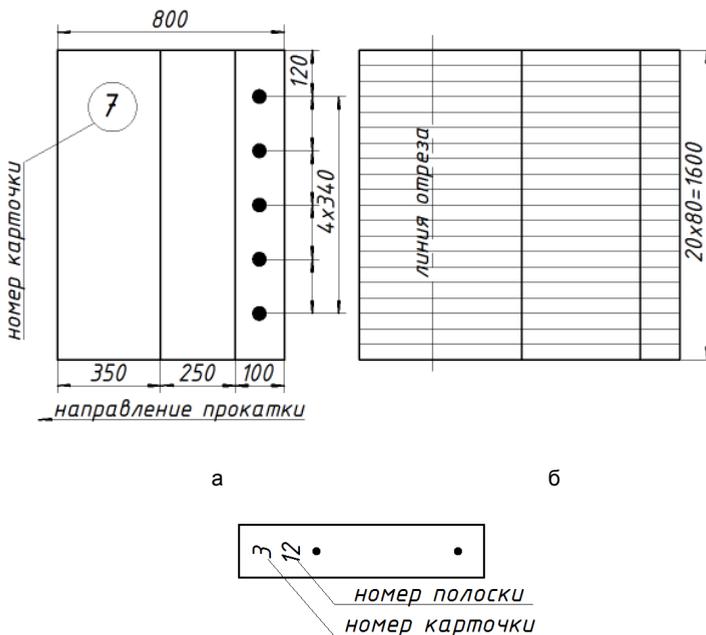


Рис. 27. Схема разметки полосы до (а) и после (б и в) прокатки

Прокатку проводили при скорости 0.2 м/с, при этом выполнили фиксацию значений аналоговых сигналов усилия на опорных валках  $P_p$  и усилия прокатки  $P$  (рис. 28).

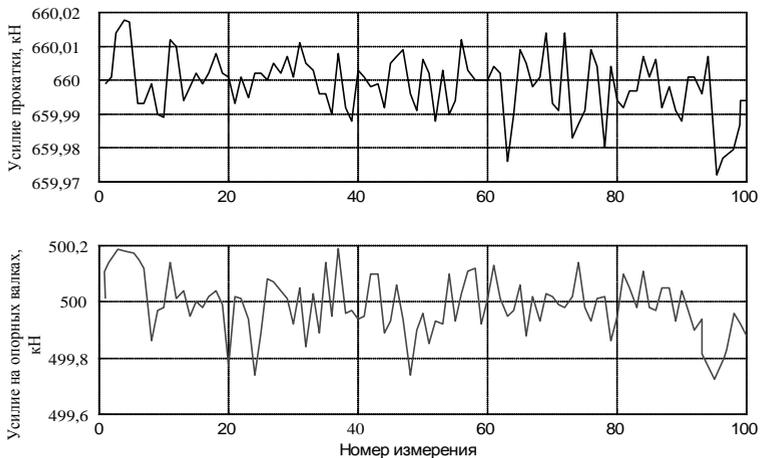


Рис. 28. Прокатка полосы шириной 1600 мм и толщиной 0,8 мм

Используя накопленные в эксперименте данные, построили зависимость усилия прокатки от толщины полосы (рис. 29), при котором происходит компенсация возникшего возмущения в толщине прокатываемой полосы.

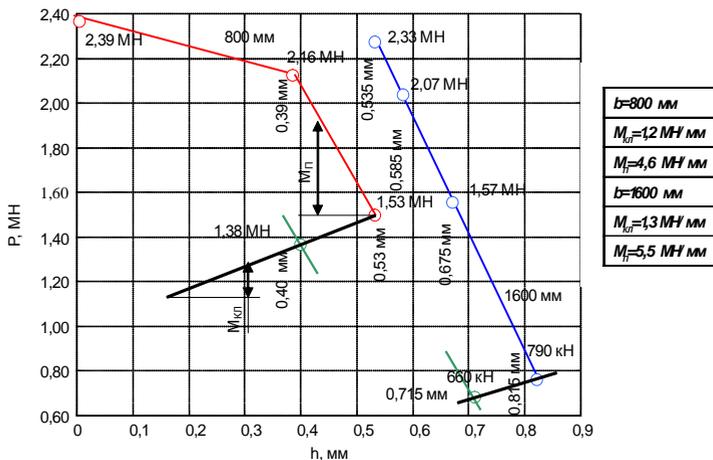


Рис. 29. Зависимость усилия прокатки  $P$  от толщины  $h_1$  карточки после прокатки: а - для ширины 800 мм; б - для ширины 1600 мм.  $M_{кл}$ ,  $M_{п}$  - жесткости клетки и полосы в процессе прокатки

Поставленная задача - вернуть толщину полосы к исходному значению - осуществляется путем увеличения усилия на опорных валах. На рис. 30 приведены зависимости приращения усилия на опорных валах от приращения усилия прокатки для компенсации формы проката, как в абсолютных значениях, так и в приращениях.

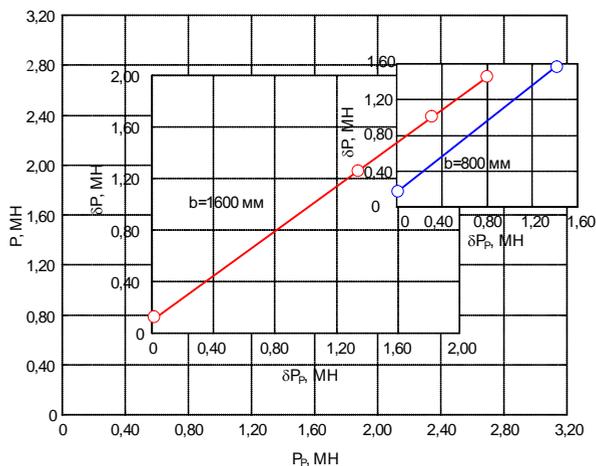


Рис. 30. Зависимость усилия прокатки  $P$  от усилия  $P_p$  на опорных валках: а - для ширины 1600 мм; б - для ширины 800 мм. Зависимость представлена в двух системах координат: в абсолютных значениях  $P$  и  $P_p$  и в приращениях  $\delta P$  и  $\delta P_p$

По данным эксперимента нашли, что основным параметром регулирования толщины и профиля полосы является коэффициент  $\alpha$  как функция от приращения усилия на опорных валках к усилию прокатки.

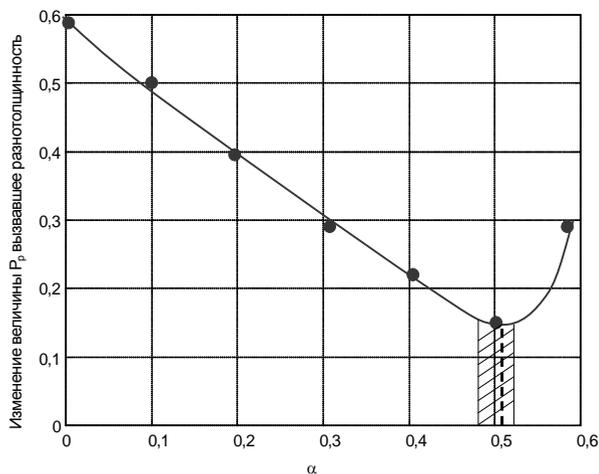


Рис. 31. Поле относительных колебаний усилия на опорных валках  $P_p$ , вызвавших продольную и поперечную разнотолщинность, которые взяты в зависимости от коэффициента  $\alpha = \delta P / \delta P_p$

Наименьшие колебания усилия  $P_p$  на опорных валках получают при  $\alpha=0,47-0,51$ , (рис. 31, заштрихованное поле).

## СОЗДАНИЕ УСЛОВИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗНОСУ ИНСТРУМЕНТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ОПЕРАЦИЯХ ВЫТЯЖКИ

Нанесение покрытий осуществляли методом конденсации из газовой фазы соединений TiN, CrN или TiAlN.

На рис. 32 показана электронная микрофотография рабочей поверхности инструмента, состоящей из сложных по форме частиц размером примерно 1 мкм.

На рис. 33 показано соотношение между температурой и адгезией технологической смазки в 10 % концентрации поданной с расходом 3,2 мл/с с расстояния в 260 мм в течение 4 с, на рабочую поверхность инструмента.

Нашли, что изменение температуры рабочей поверхности инструмента сложной геометрической формы, а также степень её истирания связаны с адгезионными свойствами применяемых для поверхностного упрочнения покрытий.

Адгезия технологической смазки возрастает при росте шероховатости  $R_z$  рабочей поверхности покрытия от 3,7 мкм и более, а при более чем 15,3 мкм происходит преждевременный износ.

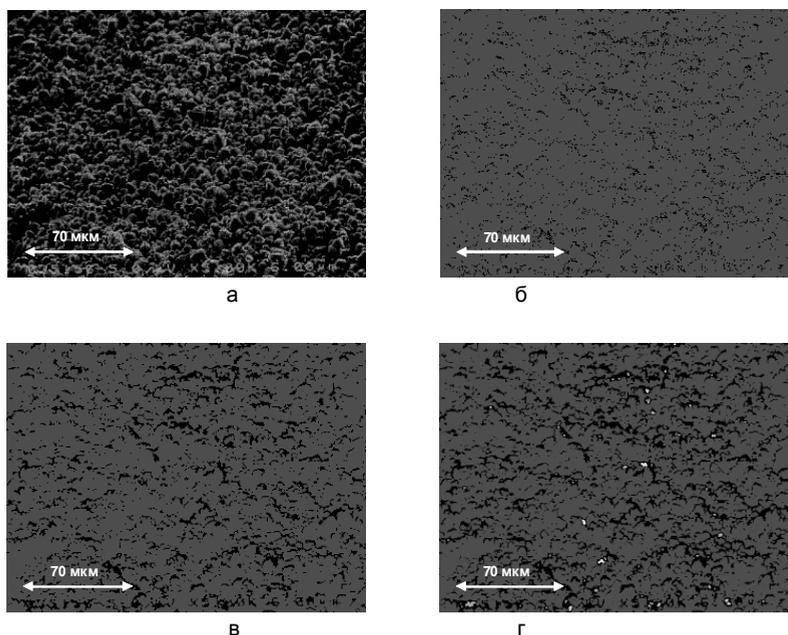


Рис. 32: а - электронная микрофотография рабочей поверхности инструмента и её морфологическая обработка; б - топология формы шероховатости поверхности; в - пики максимальной шероховатости поверхности; г - области с нулевой шероховатостью

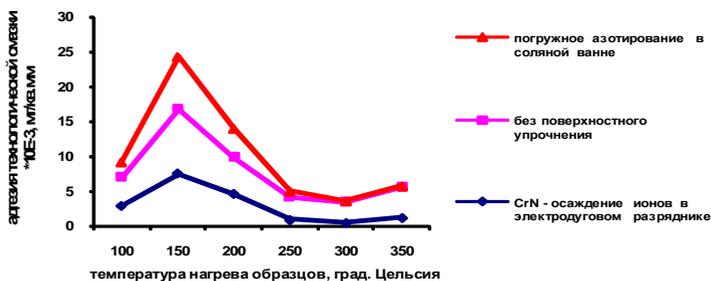


Рис. 33. Соотношение между температурой и адгезией технологической смазки, поданной с расходом 3,2 мл/с с расстояния в 260 мм в течение 4 с, на рабочую поверхность инструмента

Проверку результатов экспериментов выполнили вытяжкой с утонением стенки цилиндрических полых оболочек из алюминиевого сплава АА 3104. Для инструмента выбрали инструментальную сталь, ХВСГ, сталь закалили с температуры 845-855 °С в масле, а затем провели отпуск при температуре 175-180 °С. Твердость после термической обработки составила 59 HRC. После чего выполнили азотирование поверхности и нанесли покрытие методом конденсации из газовой фазы, при этом твердость на глубину до 25 мкм составила не менее 200 HV. Штамповку провели на горизонтальном кривошипном прессе. Эксплуатационный ресурс инструмента приведен в табл. 7.

В результате эксперимента выявлено, что эксплуатационный ресурс инструмента с многослойным покрытием в пять и более раз выше, чем у инструмента с однослойным покрытием.

Таблица 7

#### Эксплуатационный ресурс инструмента

Эксплуатационный ресурс до замены, шт	Причина вывода из эксплуатации
55240	Износ
63672	Износ
62150	Износ
78098	Износ
15144	Местное выкрашивание
13534	Местное выкрашивание

## ТЕХНОЛОГИЯ ВЫТЯЖКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

При оптимизации параметров процесса глубокой вытяжки оболочек приоритетным является вопрос уменьшения количества дорогостоящего алюминиевого сплава, идущего на оболочку, с целью снижения стоимости продукции. Один из способов решения поставленной задачи – это применение для процесса глубокой вытяжки листовой заготовки с уменьшенной толщиной.

Проведенными проектно-конструкторскими и экспериментальными исследованиями был установлен минимально достижимый диапазон толщины полосы от 0,024 до 0,021 мм. На рис. 34 показана конструкция штампового инструмента для вытяжки с утонением.

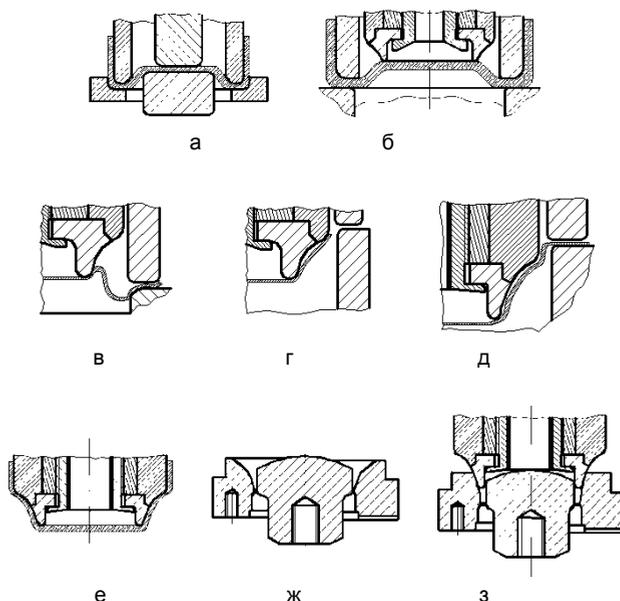


Рис. 34. Схема инструмента и вытяжка оболочки

## ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ КРИВОШИПНЫЙ ПРЕСС ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

Приведены основные результаты, полученные в ходе разработки горизонтального кривошипного пресса, предназначенного для вытяжки без зазора цилиндрической тонкостенной оболочки. Подробно освещены вопросы конструирования и эксплуатации пресса: привод, механизм подачи, пневмомеханический выталкиватель, устройство кинематической схемы, ползун, инструментальный магазин. В рамках модернизации пресса с целью повышения его производительности приведены дополнительные данные по устройству привода пресса.

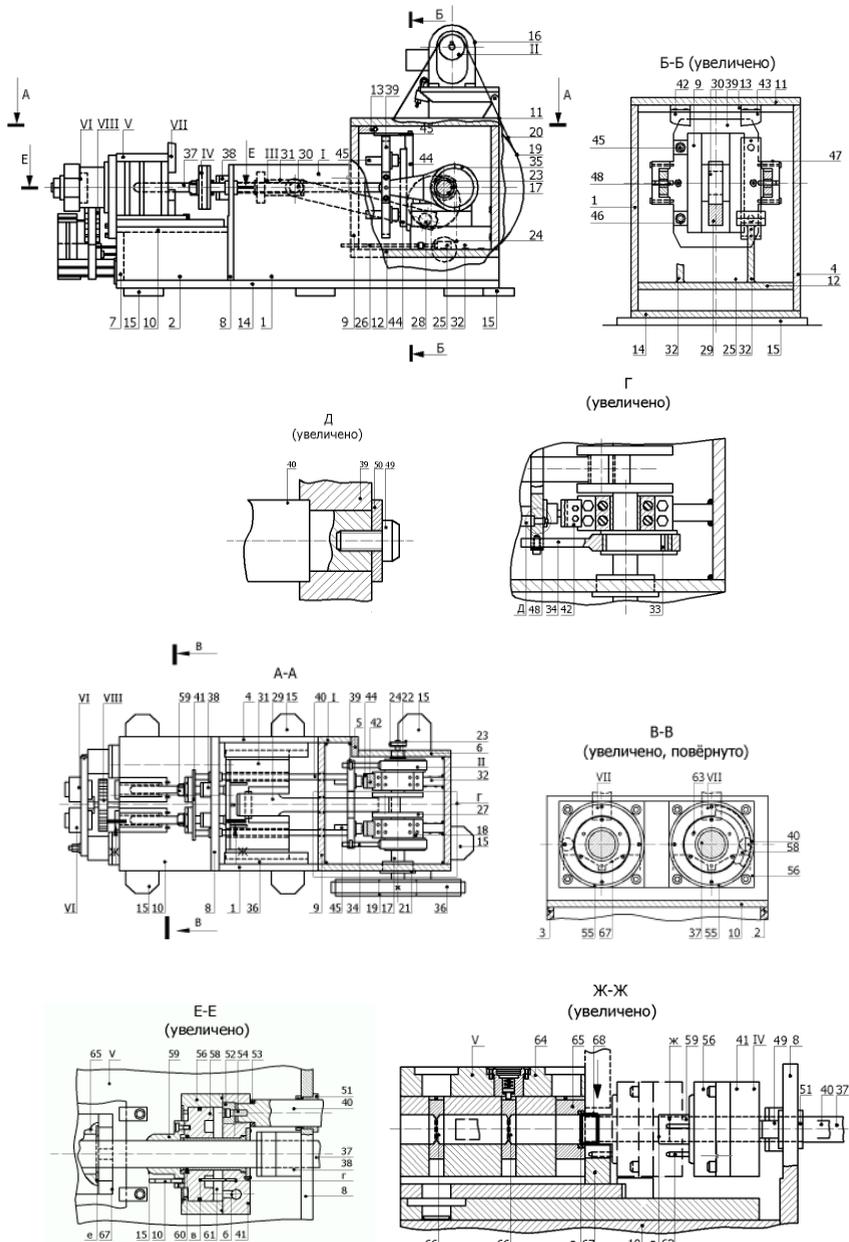


Рис. 35. Горизонтальный кривошипный пресс усилием 12кН, (1-66 – детали, описанные в диссертации)

Горизонтальный кривошипный пресс для вытяжки оболочек (см. рис. 35) состоит из: горизонтальной станины I, главного привода II, расположенного в основном внутри станины и предназначенного для передачи крутящего момента на исполнительные органы пресса, ползуна и пуансона (узел III), механизма фиксации заготовок IV, инструментального магазина V с установленными в его пределах матрицами утонения, и сводообразователя VI. В исходном положении ползуна происходит последовательная подача чашек в инструментальный магазин V с помощью механизма подачи VII. В процессе вытяжки цилиндрической тонкостенной оболочки происходит утонение стенки заготовки при одновременном уменьшении её диаметра. Сводообразователь VI, необходим для оформления днища оболочки в крайнем переднем положении ползуна. Для удаления заготовки из рабочего пространства пресса предусмотрен выталкиватель VIII.

**В главе 5** «Разработка промышленной системы контроля технологических процессов изготовления тонкостенной оболочки» даны результаты технического решения актуальной задачи проверки и контроля качества продукции в виде автоматической системы идентификации топологии формы и размеров дефектов продукции третьего металлургического передела – каталога дефектов продукции.

### **АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТОПОЛОГИИ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ ЛЕНТЫ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ**

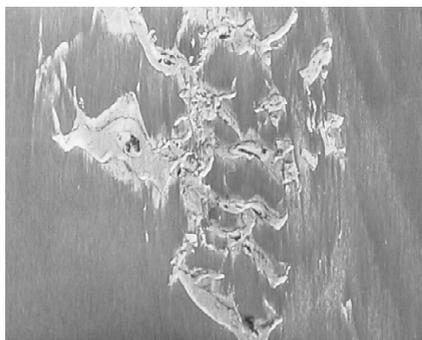
Система состоит из плат сбора видеоизображения и промышленного компьютера, монохроматического источника света и цифровой 1 дюймовой CCD камеры.

Первой основной морфологической операцией поиска несоответствий элементов продукции по базовому изображению является процедура объектного выравнивания, (рис. 36).



Рис. 36. Объектное выравнивание по базовому изображению (показана процедура нахождения несоответствий на цифровом рентгеновском снимке лопатки ГТД)

На рис. 37 показана вторая морфологическая операция определения несоответствия по пороговому уровню несоответствия с созданием разностного изображения S (объектное перекрытие). К разностному изображению применяли пороговую классификацию, в итоге получили объектное побитовое изображение В.



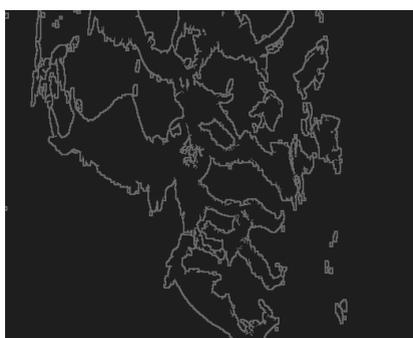
а



б



в



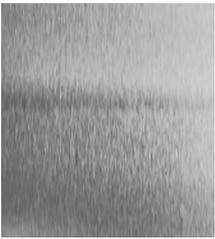
г

Рис. 37. Идентификация несоответствия (раскат грубых неровностей поверхности слитка: а - исходное изображение; б - разностное изображение – получено с применением морфологического фильтра; в - изображение после пороговой классификации – изображение графических примитивов; г - бинарное изображение несоответствия – замыкание границ (контур несоответствия)

### **КЛАССИФИКАТОР ДЕФЕКТОВ ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ЛЕНТЫ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК**

С использованием аппарата морфологического анализа выполнили построение классификатора с указанием названия дефекта и его класса (см. табл. 8).

Пример заполнения таблицы с обнаруженными дефектами

Класс	Дефект	Внешний вид полосы
1	Несоответствия поверхности, обусловленные качеством слитка и литой заготовки	 <p data-bbox="911 572 969 592">полоса</p>
2	Несоответствия поверхности, образовавшиеся в процессе деформации	 <p data-bbox="911 863 969 882">полоса</p>
3	Несоответствия поверхности, образовавшиеся в процессе деформации	 <p data-bbox="908 1137 966 1157">полоса</p>
4	Шеврон или «ёлочка»	 <p data-bbox="908 1433 966 1452">полоса</p>

## СИСТЕМА СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

Система спектрального анализа (рис. 38), позволяет определить химический состав и свойства материалов по спектральным данным, полученным в ходе рентгеновского сканирования.

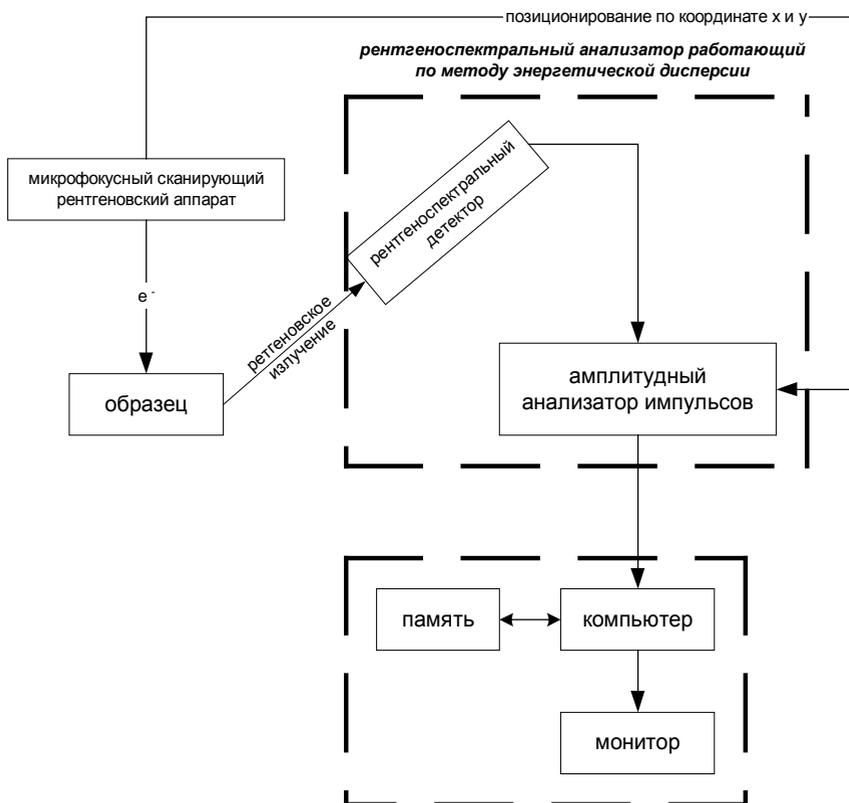


Рис. 38. Блок-схема аппаратного решения системы спектрального анализа результатов рентгеновского контроля

На рис. 39 показано изображение металлокерамики, полученное обратным рассеиванием электронов. Базовый слой композита состоит из  $Al_2O_3$ , в качестве связки для керамики использована комбинация медь-серебро-титан, а внешний слой - сплав железа с никелем и кобальтом.

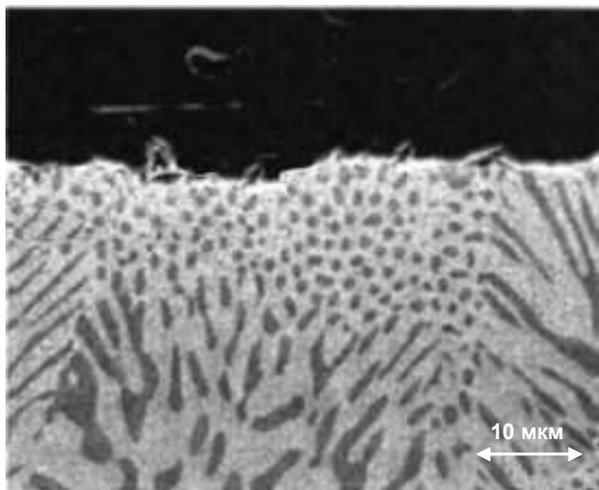


Рис. 39. Электронное изображение металлокерамики

Изображение получено с помощью 1024 канального рентгеноспектрального анализатора на прямоугольной области сечением  $65 \times 75$  точек. Наивысшая яркость точки соответствует наивысшему атомному номеру (z) элементу, входящему в микроструктуру.

На рис. 40 показан усредненный рентгеновский спектр, по 8232 спектрам, образованных в результате сканирования сечений размером  $65 \times 75$  точек образца металлокерамики.

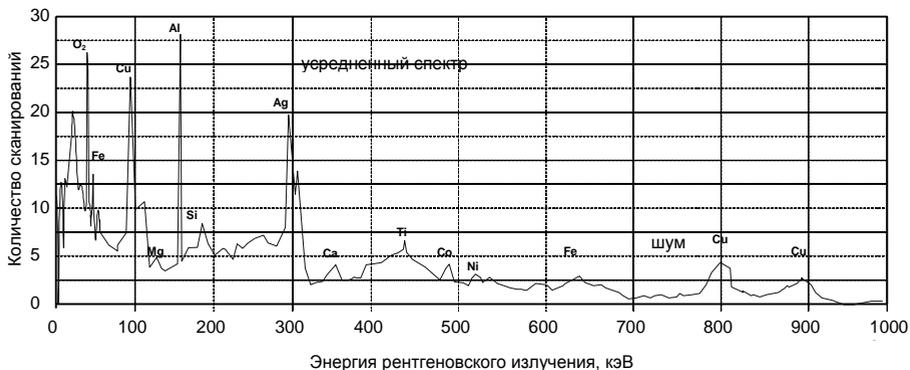


Рис. 40. Рентгеновский спектр металлокерамики (рис. 39), вычисленный усреднением всех спектров, полученных при сканировании сечений размером  $65 \times 75$  точек

Для ответа на вопрос о связи элементов в химической фазе и их взаимодействии друг с другом применили расширенный спектральный анализ, заключающийся в рассмотрении участков спектра между явными пиками.

Результаты выполнения алгоритма после 50-ти итераций методом наименьших квадратов

показаны на рис. 41 и рис. 42: (рис. 41, а) - результирующий спектр фазы  $Al_2O_3$ , (рис. 41, б) - 2-мерное распределение её концентрации, (рис. 42, а) - результирующие спектры граничных фаз (Ti, Fe, Ni и Co), (рис. 42, б) - 2-х мерное распределение их концентраций.

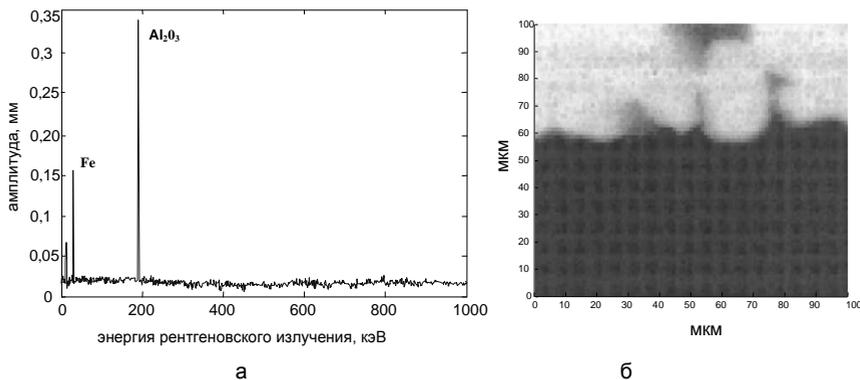


Рис. 41: а - результирующий спектр распределения фазы окиси алюминия, б - реконструкция 2-х мерного рентгеновского изображения распределения её концентрации

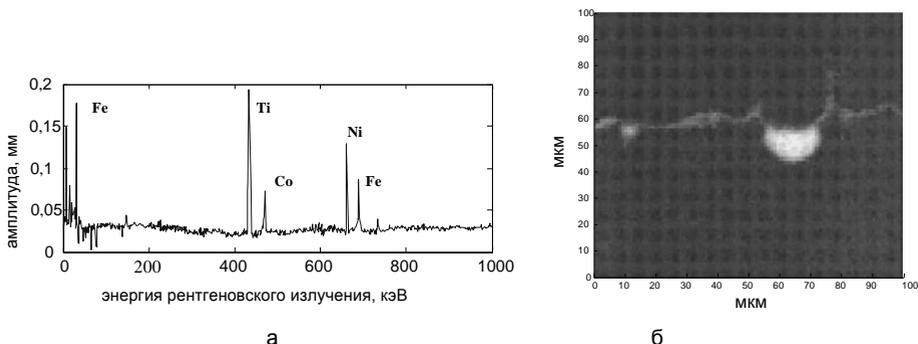


Рис. 42: а - результирующий спектр распределения граничных фаз Ti, Fe, Ni и Co и б - реконструкция 2-х мерного распределения их концентраций

## ИТОГИ И ВЫВОДЫ

На основании анализа литературы, мирового и отечественного опыта производства, создания и модернизации технологического оборудования, выполненных исследований получили дальнейшее развитие теоретические и концептуальные положения, расчетные методики, математические модели и алгоритмы. Разработаны компьютерные системы и методы управления, технологические приемы и технические мероприятия, оригинальное лабораторное и промышленное оборудование. Все это является осуществлением новых научно-обоснованных разработок, обеспечивающих решение важной прикладной проблемы – создания производства тонкостенных оболочек из сплавов

алюминия как важнейшей для повышения объемов производства алюминиевой отрасли.

Разработано вариационное определение и метод контроля геометрии сечения зерна и перемещения межзеренной границы поликристаллических материалов в процессе деформации. Работа является основанием для выделения групп отдельных технических решений и формирования общего подхода к их теоретическому обоснованию.

Аналитически исследованы и экспериментально подтверждены результаты изучения процессов изменения геометрии зерна и смещения межзеренной границы в изотропной и анизотропной микроструктурах со случайной ориентацией и положением зерен (сплав АА 3104).

Получены вариационные уравнения деформации зерна в макроструктуре и установлена конечная деформация заготовки на примере процесса вытяжки цилиндрической тонкостенной оболочки из сплава АА 3104. Методом аппроксимации вариационных уравнений с помощью воспроизводящей функции Бергмана решена контактная задача формообразования при вытяжке без зазора.

Проведена реконструкция стана кварто. В рамках реконструкции разработаны, изготовлены и успешно применены клиновое устройство, необходимое для снижения перекоса осей валков, и модернизированные опоры качения. Установка в упорном узле радиально-упорного сдвоенного шарикоподшипника, позволило снизить осевые перемещения рабочих валков и более чем в три раза увеличить долговечность опоры.

Разработан метод экспериментального изучения операций вытяжки по анизотропной и изотропной модели. Метод дополнен оригинальными методиками контроля изменения механических свойств алюминиевых сплавов. Главным отличием разработанных методов от существующих является определение свойств сплавов на моделях операций листовой штамповки идущих циклически, например, при испытании на перегиб в трех точках.

Разработан, изготовлен и используется в промышленности на ОАО «ДОЗАКЛ» горизонтальный кривошипный пресс, предназначенный для вытяжки цилиндрических тонкостенных оболочек. За счет постройки прессов с количеством ползунов до 10, конструкция пресса будет иметь существенный резерв по производительности. Высокая степень защищенности всех механизмов пресса от воздействия вибраций и одновременно низкий износ трущихся деталей пресса вследствие принудительной смазки делает пресс высоконадежным и сбалансированным агрегатом.

Предложен, теоретически обоснован и прошел экспериментальную проверку инструмент для вытяжки без зазора цилиндрических полых оболочек. Инструмент позволяет создать постоянство гидростатической подушки между поверхностями, находящимися в контакте. Гидростатическая подушка необходима для точной центровки пуансона в базе корпуса инструментального магазина. Разработаны модификации инструмента, которые позволяют изготавливать продукцию с более высоким отношением Н/Д и меньшей толщиной стенки, а также использовать в качестве заготовки более прочные и легированные (в сравнении со сплавами 3000 серии) алюминиевые сплавы 5000

серии с меньшей толщиной.

Разработан и внедрен комплекс лабораторного оборудования для одновременного испытания на растяжение и изгиб алюминиевых сплавов используемых в операциях вытяжки. С помощью комплекса экспериментально подтверждены анизотропная и изотропная математические модели влияния реверсивной нагрузки и эффекта пружинения в условиях двусосного напряженно-деформированного состояния. Получена хорошая сходимостъ аналитических данных с экспериментами вытяжки с прижимом цилиндрической полой чашки и вытяжки без зазора цилиндрической тонкостенной оболочки, опытов по отбортовке-вытяжке.

Разработан и экспериментально проверен аналитический метод прогнозирования разрушения матриц в процессе вытяжки тонкостенных цилиндрических оболочек. Установлены причины разрушения матриц в процессе вытяжки оболочек. Установлен факт несовпадения максимума на кривой изменения усилия вытяжки с точкой возникновения максимального напряжения. Выработаны рекомендации по проектированию инструмента для процессов вытяжки.

Технически решена и программно реализована задача проверки и контроля качества продукции третьего металлургического передела (прокатное, кузнечно-штамповочное, трубное и другие производства). Создана автоматическая система идентификации дефектов продукции третьего металлургического передела – каталога дефектов продукции. Система позволила оптимизировать капитальные вложения в совершенствование металлургического оборудования, повысить надёжность технологических процессов, достигнуть их долгосрочной повторяемости, сократить выход брака и претензии от потребителей и, как следствие, осуществить осмысленную политику в области качества по системе ISO 9001-2000.

Разработана и эксплуатируется система диагностики и контроля технического состояния металлургического оборудования. Система позволяет диагностировать оборудование без его разборки, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт, повысить качество обслуживания и ремонта, решить задачу сокращения простоев оборудования из-за внеплановых простоев, аварий, а также в отсутствии на предприятиях системы Технического Обслуживания и Ремонта.

На базе сканирующего микрофокусного рентгеновского аппарата с присоединенным к нему рентгеноспектральным анализатором, работающим по методу энергетической дисперсии, создана и промышленно опробована система рентгеновского контроля материалов. Система предназначена для точного определения состава химических элементов и их фаз в исследуемом материале. Система нашла применение при исследовании свойств материалов, идущих на изготовление инструмента для операций вытяжки.

#### **Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

1. Скоробогатов, А.О. Немножественное геометрическое моделирование процессов серийного изготовления изделий художественнойковки [Текст] / А.О. Скоробогатов // Известия вузов, Цветная металлургия. 1999 г. № 6. - С. 69-73.

2. Зимин, Ю.А. Методика множественного геометрического моделирования объектов сложной формы [Текст] / Ю.А. Зимин, А.О. Скоробогатов, А.П. Борисов // Технология легких сплавов. 2000 г. № 1. - С. 41-45.
3. Скоробогатов, А.О. Об оптимизации коэффициента  $\alpha = \delta P / \delta P_p$ . [Текст] / А.О. Скоробогатов, А.П. Борисов, С.М. Емельянов, Д.Н. Рыбаков // Технология легких сплавов. 2001 г. № 4. - с. 44-47.
4. Скоробогатов, А.О [Текст] / Метод определения упругих деформаций при эксплуатации тяжелого металлургического оборудования // А.О. Скоробогатов, А.П. Борисов, А.П. Спиридонов // Производство проката. 2001 г. № 11. - С. 32-35.
5. Скоробогатов, А.О. Разработка клинового устройства планок проема подушки нижнего опорного вала [Текст] / А.О. Скоробогатов, А.П. Борисов, С.М. Емельянов, Д.Н. Рыбаков // Технология легких сплавов. 2002 г. № 1. - С. 30-32.
6. Скоробогатов, А.О. Насечение валков прокатных станов для производства полосы из алюминия и его сплавов предназначенной для глубокой вытяжки [Текст] / А.О. Скоробогатов // Производство проката. 2001 г. № 11. - С. 32-38.
7. Скоробогатов, А.О. Глубокая вытяжка круглой полый оболочки из алюминиевого сплава [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2003 г. № 9. - С. 61-64.
8. Скоробогатов, А.О. Горизонтальный кривошипный пресс для массового производства полых оболочек [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2003 г. № 10. - С. 9-14.
9. Борисов, А.П. Разработка модуля диагностики опор качения металлургического оборудования [Текст] / А.П. Борисов, А.О. Скоробогатов // Технология легких сплавов. 2004 г. № 2. - С. 50-56.
10. Борисов, А.П. Каталог дефектов плоского проката [Текст] / А.П. Борисов, А.О. Скоробогатов // Производство проката. 2004 г. № 2 и 3. - С. 20-26 и 21-28.
11. Скоробогатов, А.О. Механизм подачи полых оболочек в горизонтальный кривошипный пресс [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2004 г. № 7. - С. 10-13.
12. Скоробогатов, А.О. Пневмомеханический выталкиватель поковок из горизонтального кривошипного пресса глубокой вытяжки [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2003 г. № 9. - С. 16-20.
13. Скоробогатов, А.О. Использование систем оптической дефектоскопии в металлургии. [Текст] / А.О. Скоробогатов А.П. Борисов, А.В. Спиридонов, Д.Н. Рыбаков // Контроль. Диагностика. 2004 г. № 4. - С. 24-29.
14. Скоробогатов, А.О. Автоматическая система идентификации топологии формы и размеров дефектов продукции третьего металлургического передела – каталог дефектов продукции. [Текст] / А.О. Скоробогатов, А.П. Борисов, А.В. Спиридонов // Контроль. Диагностика. 2004 г. № 5. - С. 45-53.
15. Скоробогатов, А.О. Рентгеноспектральный анализ материалов [Текст] / А.О. Скоробогатов // Контроль. Диагностика. 2005 г. №8. - С. 41-54.
16. Скоробогатов, А.О. Инструмент для вытяжки с утонением цилиндрических полых оболочек из

- алюминиевых сплавов [Текст] / А.О. Скоробогатов // Технология металлов. 2005 г. № 11. - С. 17-19.
17. Скоробогатов, А.О. Покрытия инструмента для процессов обработки металлов давлением (ОМД) с высокими значениями стойкости к истиранию и сопротивлением износу [Текст] / А.О. Скоробогатов // Технология металлов. 2005 г. № 11. - С. 23-26.
18. Скоробогатов, А.О. Исследование изменения геометрии структуры материала в процессе вытяжки [Текст] / А.О. Скоробогатов // Технология металлов. 2006 г. № 1. - С. 33-39.
19. Скоробогатов, А.О. Инструментальный магазин для глубокой вытяжки оболочек на кривошипных прессах [Текст] / А.О. Скоробогатов // Заготовительные производства. 2007 г. № 1. - С. 17-21.
20. Скоробогатов, А.О. Исследование кинематики и динамики систем металлургического оборудования [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2006 г. № 11. - С. 10-17.
21. Скоробогатов, А.О. Инструментальный магазин для глубокой вытяжки симметричных и несимметричных оболочек на кривошипных прессах [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2006 г. № 12. - С. 60-62.
22. Скоробогатов, А.О. Разработка матричного аппарата для исследования кинематики и динамики систем металлургического оборудования в трехмерных координатных системах [Текст] / А.О. Скоробогатов // Вестник машиностроения. 2006 г. № 9. - С. 22-28.