

**Национальная академия наук Кыргызской Республики
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ**

**Министерство образования и науки Кыргызской Республики
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. Раззакова**

Диссертационный совет Д. 05.16.523

На правах рукописи

УДК 656.13

УДЕРБАЕВА АСЕМГУЛЬ ЕРКИНБЕКОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА
ПРЕСС-ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ
УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ОБРАБОТКИ**

05.02.08 - «Технология машиностроения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек – 2017

Работа выполнена в **Казахском национальном исследовательском техническом университете имени К.И. Сатпаева (КазНITU)**

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Абсадыков Бахыт Нарикбаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Муслимов Аппас Поясович

кандидат технических наук, доцент
Тутлис Валерий Петрович

Ведущая организация: **Алматинский технологический университет** (г. Алматы, ул. Толе би, 100)

Защита состоится «12» мая 2017 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д.05.16.523 при Институте машиноведения Национальной академии наук Кыргызской Республики, Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова Министерства образования и науки Кыргызской Республики по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института машиноведения Национальной академии наук Кыргызской Республики и на сайте <http://imash.kg/index.php/soiskatel-uderbaeva-asemgul-erkinbekovna>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, с подписью, заверенной гербовой печатью, просим направлять по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23, Институт машиноведения НАН КР, диссертационный совет Д.05.16.523 или по e-mail: imash.dissovet@gmail.com.

Автореферат разослан «10» апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.05.16.523, к.т.н., с.н.с



Квитко С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Структура и свойства сплавов зависят от химического состава, предварительной деформации и условий прессования, а также от вида последующей термической обработки. При этом степень фазового состава и последующего охлаждения твердого раствора зависит от скорости снижения температуры, а градиент температур по объему твердого раствора отвечает за формирование не только зеренной структуры, но и термических напряжений, способных создавать межкристаллитные трещины, которые в своем развитии могут превратиться в магистральные, с выходом на поверхность слитка. На формирование структуры оказывают влияние технологические особенности, присущие каждому конкретному предприятию. Возможно, по этой причине нет прямых экспериментальных данных о распределении температур по объему слитка в процессе кристаллизации и последующего охлаждения, полученных в заводских условиях. Качество получаемой в процессе выплавки структуры определяет все дальнейшее поведение материала в процессе изготовления металлоизделия и его эксплуатации. По этой причине поиск путей получения сплава с оптимальными физико-механическими свойствами является **актуальной** задачей.

Большой практический интерес с точки зрения простоты, обеспечения заданных свойств и снижения себестоимости изделий представляет собой управление структурой путём регулирования температурно-деформационных режимов обработки. Тем не менее, определение необходимых режимов обработки является сложной задачей, связанной с техническими трудностями при получении данных о распределении напряжённо-деформированного состояния и температуры в очаге деформации обрабатываемой заготовки.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование технологии обработки для производства заготовок прессового производства с целью повышения качества профилей, являются **актуальными**.

Целью настоящего исследования является совершенствование технологии изготовления пресс-изделий из алюминиевых сплавов для повышения эффективности их производства.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи:**

- исследование закономерности распределения химического состава, зеренной структуры и кратковременных механических свойств

слитков из алюминиевого сплава, получаемого в промышленных условиях;

- определение градиента температуры по объему слитков при кристаллизации методом экспериментально-имитационного моделирования;

- исследование процесса старения деформируемого алюминиевого сплава АД31 после кристаллизации;

- исследование закономерности распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) при обработке алюминиевых сплавов методом компьютерно-имитационного моделирования;

- разработка новой технологии производства пресс-изделий, обеспечивающей улучшение качества профилей за счет вариации режимов деформирования.

Основные научные положения, представляемые к защите:

1. Установлены закономерности распределения температур, химического состава, величин зерен и механических свойств по сечению слитка алюминиевого сплава АД31 на основе комплексных экспериментальных исследований процесса кристаллизации слитков.

2. Экспериментальным путем выявлена динамика старения и упрочнения алюминиевого сплава, сопровождающаяся ростом предела текучести, временного сопротивления и снижением запаса пластичности.

3. На основании экспериментальных данных получены зависимости, характеризующие изменение температуры по сечению слитка, кратковременных механических свойств от времени старения, а также предела текучести от величины накопленной пластической деформации.

4. Методом конечных элементов получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения напряженно-деформированного состояния при деформировании слитков на специальном крестообразном устройстве.

5. Установлена возможность производства профиля высокого качества из алюминиевого сплава АД31 с учетом состояния механических свойств после старения, гомогенизирующего отжига и деформационного упрочнения с применением новой конструкции крестообразной установки с автоматическим управлением режимами работ для получения заготовок с мелкозернистой структурой.

Научная новизна работы:

- на базе имитационных экспериментальных данных установлен профиль распределения температур по глубине слитка при его отливке и на их основе установлены закономерности распределения

химического состава, величин зерен и механические свойства по сечению слитка;

- экспериментальным путем выявлена динамика старения и упрочнения алюминиевого сплава, сопровождающаяся ростом предела текучести, временного сопротивления и снижением запаса пластичности;

- на основе экспериментальных данных получены зависимости, характеризующие изменение температур по сечению слитка, кратковременных механических свойств от времени старения, а также предела текучести от величины накопленной пластической деформации;

- получены количественные данные и установлены основные закономерности изменения напряженно-деформируемого состояния при деформировании слитка в специальном крестообразном устройстве;

- определены возможности производства профиля из алюминиевого сплава АД31 с учетом состояния механических свойств после старения, гомогенизирующего отжига и деформационного упрочнения, а также возможность применения крестообразной установки новой конструкции с автоматическим управлением режимами работ.

Практическая значимость полученных результатов:

- усовершенствована технология подготовки структуры заготовок, используемых при прессовании;

- предложена схема оценки возможности производства профиля из алюминиевого сплава АД31 с учетом состояния механических свойств после старения, гомогенизирующего отжига и деформационного упрочнения;

- разработаны рекомендации по совершенствованию технологии получения заготовок алюминиевого сплава АД31 и производства профилей методом прессования;

- разработано специальное устройство для прессования изделий с автоматическим управлением режимами работ, на которое подана заявка на получение патента.

Реализация работы. Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики в соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ Института промышленной инженерии КазННТУ имени К.И. Сатпаева.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и

машиностроения» (Алматы, КазНТУ 2009 г.), Международной конференции «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии» (Алматы, КазНТУ 2010 г.), Международной научно-технической конференции «Новое в станкостроении, материаловедении и автоматизированном проектировании машиностроительного производства» (Алматы, КазНТУ 2010 г.), Международной конференции (Ченстохова, Польша, 2015 г.).

Публикации. Материалы диссертации изложены в 25 статьях, в том числе 1 статья в международном журнале, входящего в базу индексирования научных публикации Scopus и 13 статей в журналах, рекомендованных ВАК КР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников, включающего 134 наименований, и 2-х приложений. Объем диссертации – 164 страницы машинописного текста, 88 формул, 13 таблиц, 75 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблем и новизна темы диссертации, сформулирована цель работы, поставлены задачи исследования и изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены пути совершенствования технологии прессования алюминиевых сплавов, структура и фазовый состав негомогенизированных слитков, влияние гомогенизации на структуру и фазовый состав слитков, влияние деформации на рекристаллизацию и полигонизацию алюминиевых сплавов, влияние предварительной деформации на структуру прессованных изделий, влияние температурно-скоростных параметров прессования на качество пресс-изделий.

Во второй главе дано описание методики подготовки образцов для комплексных экспериментальных исследований. Анализ химического состава проводился двумя методами: методом спектрального анализа и рентгено-флюоресцентным методом. Распределение ряда химических элементов исследовалось в диаметральном направлении (по глубине слитка) на образцах, приготовленных из нижней, средней и верхней частей заготовок трех плавок. На рисунке 1 приведены графики, отражающие распределение ряда химических элементов в диаметральном направлении (по глубине слитка).

Из анализа графиков следовало, что происходит обеднение состава сплава по мере движения от поверхности слитка к его центральной оси. Графики независимо от места исследований (верхняя, средняя или нижняя часть слитка) нелинейны и имеют качественно одинаковый вид. В таблице 1 приведены результаты исследований химического состава образцов алюминиевого сплава для трех плавов.

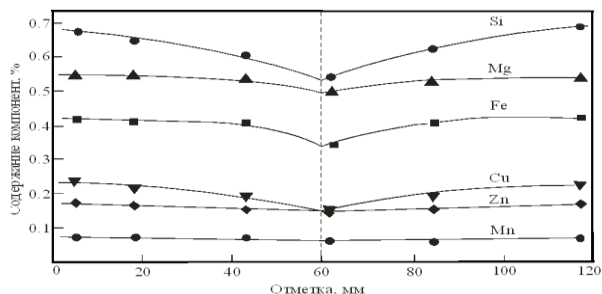


Рисунок 1 – Химический состав сплава по глубине слитка

Таблица 1. Содержание химических элементов (в %) в различных плавках алюминиевого сплава АД31

Элемент	Номер плавки			
	Плавка 1, (верхняя часть)	Плавка 2, (верхняя часть)	Плавка 3, (верхняя часть)	Справочные данные
Fe	0,39/0,31	0,38/0,32	-	0,5
Si	0,60/0,48	0,48/0,39	-	0,3-0,7
Mg	0,56/0,44	0,44/0,30	-	0,4-0,9
Элемент	Плавка 1, (средняя часть)	Плавка 2, (средняя часть)	Плавка 3, (средняя часть)	
Fe	0,38/0,30	-	0,63/0,53	- -
Si	0,64/0,48	-	0,71/0,56	- -
Mg	0,53/0,45	-	0,52/0,45	- -
Элемент	Плавка 1, (нижняя часть)	Плавка 2, (нижняя часть)	Плавка 3, (нижняя часть)	
Fe	0,42/0,34	0,43/0,33	-	- -
Si	0,67/0,54	0,48/0,37	-	- -
Mg	0,54/0,50	0,44/0,32	-	- -

Исследования с помощью оптической металлографии показали, что в сердцевинной части объема средняя величина зерна больше, чем в области, прилегающей к поверхности.

Выполнено исследование динамики процесса старения и связанных с ним изменений прочностных и пластических характеристик. Сопротивление металлических материалов растяжению

и сжатию, как правило, одинаковое (или отличается незначительно), и поэтому численные значения кратковременных механических свойств в обоих случаях характеризуются одной и той же величиной. По этой причине их определение проводилось по диаграммам растяжения. Целью проведения испытаний на сжатие было определение критических значений деформаций и напряжений, при которых проходило разрушение образцов. Такой подход в наибольшей степени соответствует реальным рабочим условиям производства профилей.

Деформируемые алюминиевые сплавы подвержены старению. В дополнение к этому следует отметить, что они также испытывают деформационное упрочнение. Несмотря на то, что в технической литературе имеются отдельные сведения об их механических, технологических и других свойствах, существует необходимость проведения комплексных экспериментальных исследований каждого конкретного материала ввиду особенностей, обусловленных спецификой производства. К тому же, динамика старения и деформационного упрочнения данного материала в производстве всесторонне не изучена.

Диаграммы растяжения были получены при постоянной скорости деформирования, поскольку производство профилей из алюминиевого сплава АД31 ведется методом экструзии, т.е. с постоянной скоростью деформирования. Наиболее близкой к рабочим условиям является скорость 0,5 мм/мин.

На рисунке 2 показана, в качестве примера, одна из диаграмм растяжения, полученная из образца плавки № 1.

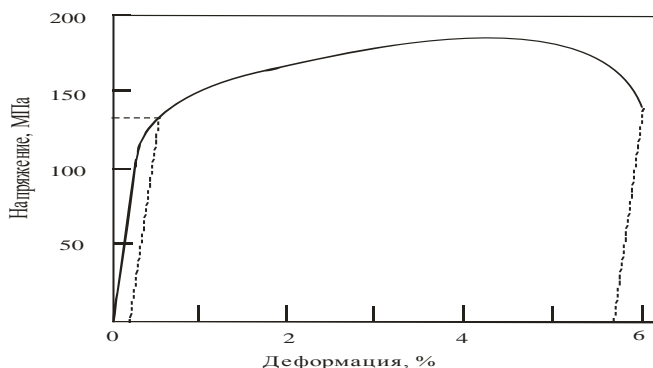


Рисунок 2 – Диаграмма растяжения образца алюминиевого сплава АД31 ($\sigma_{02} = 132,2$ МПа, $\sigma_b = 189,3$ МПа, $\delta = 5,65\%$)

Кинетика старения прослеживалась при оценке изменения предела текучести σ_{02} . Следует отметить, что σ_{02} рассматривается как интегральный структурно-чувствительный параметр.

В сплаве с течением времени протекает несколько процессов, каждый из которых вносит свой вклад в формирование структуры. Мы практически всегда должны иметь возможность оценки суммарного вклада всех процессов. Такую возможность представляет измерение предела текучести. Любые изменения структуры (концентрация дефектов, величина зерна и его изменение, зарождение и растворение фаз и т.д.) сказывается на величине предела текучести. Наличие экспериментальных данных позволило провести анализ динамики процесса старения с построением ряда графиков (рисунки 3 и 4).

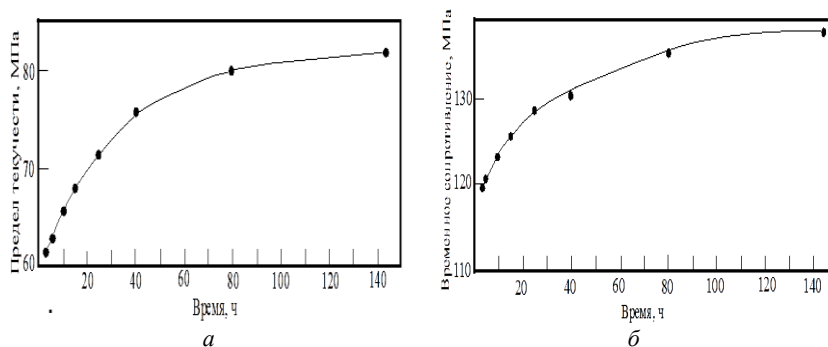


Рисунок 3 – Зависимость предела текучести (а) и временного сопротивления от времени старения алюминиевого сплава АД31

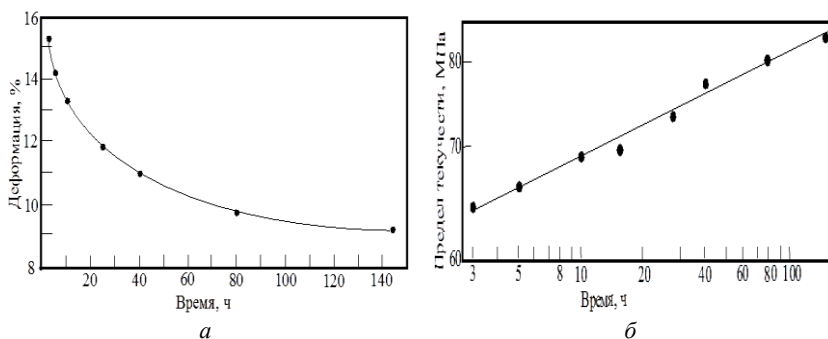


Рисунок 4 – Зависимость деформации (а) и предела текучести от времени старения в двойных логарифмических координатах (б) сплава АД 31 после кристаллизации

Из рисунка 3, а видно, что величина предела текучести изменяется с увеличением продолжительности старения нелинейно. Наиболее интенсивно предел текучести изменяется в первые 40 часов. В дальнейшем его рост замедляется. Аналогично ведет себя и временное сопротивление. Увеличение предела текучести и временного сопротивления можно было бы отнести к положительным эффектам, если при этом не наблюдалась бы значительная потеря пластичности. А именно, эта величина относится к числу основных при производстве изделий методом прессования.

Построение графиков в двойных логарифмических координатах трансформирует их в прямолинейные. Примером служит рисунок 4, б.

Это позволяет записать уравнения

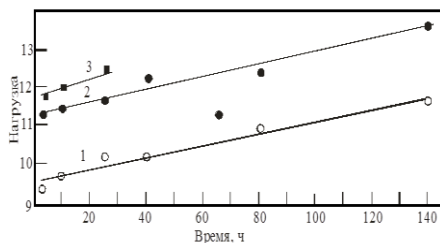
$$\sigma_{02} = \alpha \tau^{\phi}; \quad \sigma_b = \beta \tau^{\psi}; \quad \delta = \gamma \tau^q, \quad (1)$$

где α, β, γ – коэффициенты, ϕ, ψ, q – показатели степени. Величина показателей степени равна тангенсу угла наклона прямолинейных графиков к оси абсцисс. Расчет показал, что $\phi = 7,7 \cdot 10^{-2}$, $\psi = 3,8 \cdot 10^{-2}$, $q = -13,0 \cdot 10^{-2}$. Сравнение величин показателя степени говорит, что наиболее сильное влияние старение оказывает на пластичность. Расчет коэффициентов дал следующие значения: $\alpha=56,9$; $\beta=114,07$; $\gamma=17,77$.

Графически они представляют собой точки пересечения прямолинейных графиков с осью ординат при их экстраполяции. При производстве профилей различного назначения методом прессования материал испытывает в большинстве случаев сжатие. Приведенные ниже результаты можно отнести к категории имитирующих экспериментов. Исследования проводились на образцах 6-ти партий по 3 в каждом. Временные интервалы были выбраны с учетом ориентира на испытания при одноосном растяжении. Величины деформации для образцов всех партий были одинаковыми: 3 %, 7 % и 10 %. По результатам, исследований были построены графики, показанные на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что, вследствие старения, невозможно было продеформировать на 10% образец алюминия через 40 часов старения (график 3). На поверхности образца при достижении пластической деформации более 8% появляются трещины, а затем происходит его разрушение. Сравнение графиков 1, 2 и 3 рисунка 5 показывает, что по мере роста величины требуемой деформации, растет нагрузка. Возможной причиной этого является деформационное упрочнение, свойственное практически всем конструкционным материалам. Поэтому следующим шагом в исследованиях сплава явилось получение данных по деформационному упрочнению.

Изучено деформационное упрочнение алюминиевого сплава АД31. Оно, как и старение сплава, проявляется в изменении кратковременных механических характеристик. Но, несмотря на внешнюю схожесть, эти два процесса различны, потому что процессы старения не требуют приложения дополнительной нагрузки. Старение обусловлено чисто диффузионными процессами. И, как было показано выше, кратковременные механические свойства в этом случае являются функцией времени. При деформационном упрочнении эти характеристики представляют собой функцию накопленной пластической деформации.



1 – деформация 3%, 2 – деформация 7%, 3 – деформация 10%

Рисунок 5 – Сопротивление деформации сжатия алюминиевого сплава АД31 в процессе старения

Исследования проводились с использованием метода построения циклограмм. График зависимости предела текучести от накопленной пластической деформации построен в двойных логарифмических координатах (рисунок 6).

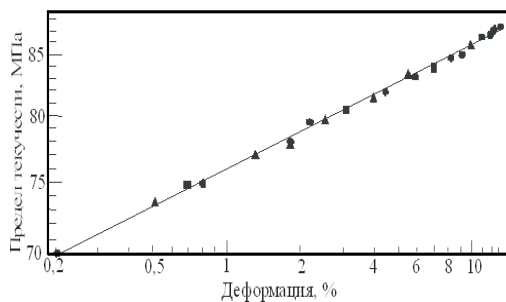


Рисунок 6 – Зависимость предела текучести алюминиевого сплава АД31 от величины накопленной пластической деформации

Он описывается степенным уравнением:

$$\sigma_{02} = j\varepsilon^v, \quad (2)$$

где j – коэффициент, v – показатель степени.

Экспериментальные результаты позволяют сделать некоторые важные в практическом плане выводы:

- структура сплава по оси слитка в радиальном направлении неоднородна. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные по исследованию химического состава, размера зерна, величин кратковременных механических свойств;

- в алюминиевом сплаве АД31 после кристаллизации протекает процесс старения, сопровождающийся увеличением предела текучести, временного сопротивления и снижением запаса пластичности.

- в сплаве АД31 наблюдается ярко выраженный эффект деформационного упрочнения, который аналогично старению приводит к изменению механических свойств.

Для более полного понимания выявленных эффектов, необходимы были данные по температурному режиму кристаллизации.

Исследовано температурное поле при разливке слитков сплава АД31. Температурное поле и скорость его изменения являются определяющими в формировании микроструктуры заготовок в виде слитков. По этой причине создание модели распределения температур в радиальном направлении и по высоте слитка имеет важное прикладное значение.

На рисунке 7 показаны три условные зоны. Линия АОВ представляет собой сечение конуса, на поверхности которого равновесные условия кристаллизации. Кристаллизация внутри конуса протекает с большой скоростью с преимущественной отдачей тепла в направлении днища. Выше образующей АОВ тепловой поток преимущественно направлен к цилиндрической поверхности. Условия в зоне II отличаются от условий зоны I меньшей скоростью кристаллизации. Это приводит к различиям в физико-механических свойствах по высоте слитка.

Зона III характеризует окончание кристаллизации слитка. Линия KLM представляет собой фронт кристаллизации. Это также поверхность усадочной раковины. Условия кристаллизации на поверхности раздела атмосфера – расплав отличаются не только от условий кристаллизации в зоне I и II, но и в объеме, примыкающем к линии раздела. Отсутствие жидкой фазы выше линии KLM и наличие большого градиента температур по линии раздела создает

преимущественные тепловые потоки в атмосферу. Отметим, что представленное деление условно, и не может быть очерчено резкими границами.

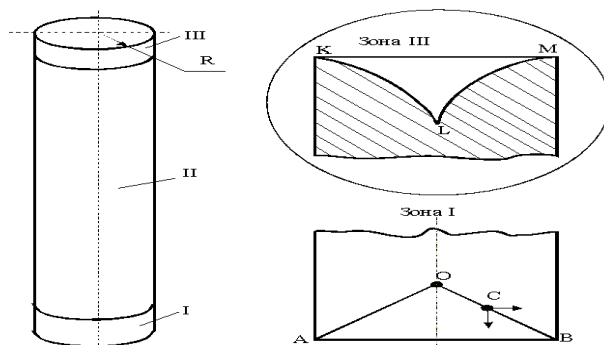


Рисунок 7 – Зоны кристаллизации алюминиевого сплава АД31

Изменения происходят плавно, а ширина переходных объемов будет зависеть от конкретных условий производства. Поэтому было сделано следующее допущение: поверхность усадочной раковины, образующая которой обозначена линией KLM (она же – поверхность раздела), представляет собой фронт кристаллизации и отражает распределение температур. В пользу такого предположения говорит рисунок 1, показывающий распределение химических элементов в радиальном направлении заготовки.

Для изучения поверхности раздела изготавливался «слепок» усадочной полости. При этом после охлаждения поверхности раздела атмосфера – металл делалась доливка, которая после затвердевания извлекалась из полости. По такой реальной модели рассчитывалась форма фронта кристаллизации. Температура на цилиндрической поверхности слитка принималась равной температуре подаваемой в кристаллизатор воды: 25 °С. В центре слитка температура принималась равной температуре расплава: 750 °С. В итоге была получена линия распределения температур в радиальном направлении слитка. Она показана на рисунке 8. Однако, полученная модель требовала экспериментальной проверки. Изменение распределения температур проводилось при отливке бруска размерами 25x25x190 мм. По большой оси отливки располагались хромель-алюмелевые термопары в количестве 11 штук. Полученные таким образом экспериментальные данные показаны на рисунке 9 точками в виде квадратов.

График прямолинеен и может быть описан уравнением экспоненциального типа.

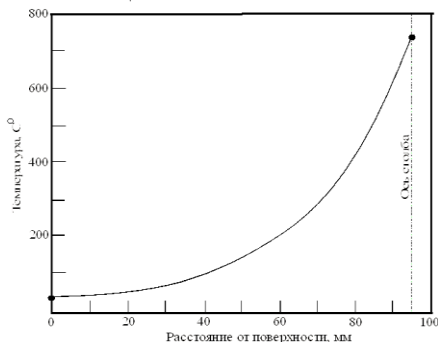


Рисунок 8 - Распределение температуры по радиусу при непрерывной разливке слитка алюминиевого сплава АД31 диаметром 190 мм (график построен в простых координатах)

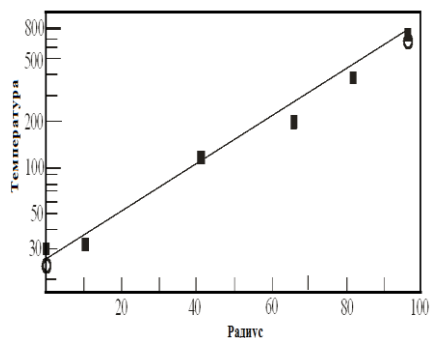


Рисунок 9 – Распределение температуры по радиусу при непрерывной разливке слитка алюминиевого сплава АД31 диаметром 190 мм (построен логарифмических координатах)

Имитационный эксперимент показал, что температура на поверхности слитка, равная 31 °С, в начальный момент кристаллизации несколько выше температуры охлаждающей воды, равной 25°С. Отметим, что распределение температур фиксировалось в момент, когда стабилизировалась температура на поверхности торца.

Температура в середине бруска при этом составляла 680°С.

$$T_i = T_a \exp(\eta r_i), \quad (3)$$

где T_i - температура в точке i (i принимает значения от 0 до r); T_a - температура воды; η - коэффициент пропорциональности; r_i - расстояние от точки i до поверхности слитка.

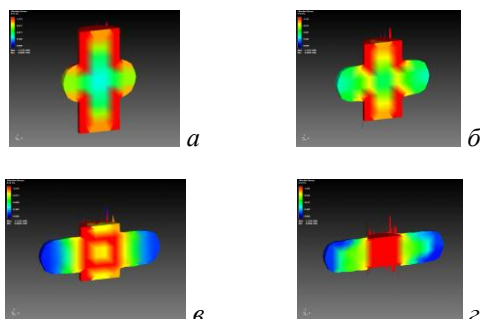
Анализ результатов комплексных экспериментальных исследований помогает в выборе путей совершенствования производства.

В третьей главе исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки при деформировании в специальном устройстве с автоматическим регулированием режимами работ.

Для моделирования НДС применен программный продукт конечно-элементного анализа MSC.SuperForge, специализированный для расчета процессов обработки металлов давлением. Рассматривался процесс прессования в устройстве для получения заготовок с

мелкозернистой структурой. Заготовка представляет собой цилиндр с размерами $\varnothing 50 \times 100$ мм. В качестве материала заготовки выбран алюминиевый сплав с температурным диапазоном деформирования 300–450 °С и с механическими свойствами: модуль упругости 75 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3 и плотность 3800 кг/м³. Для моделирования пластичности материала заготовки была выбрана упругопластическая модель Джонсона-Кука.

Трехмерная геометрическая модель инструмента построена в CAD-программе Inventor, и импортирована в САЕ-программу MSC.SuperForge (рисунок 10).



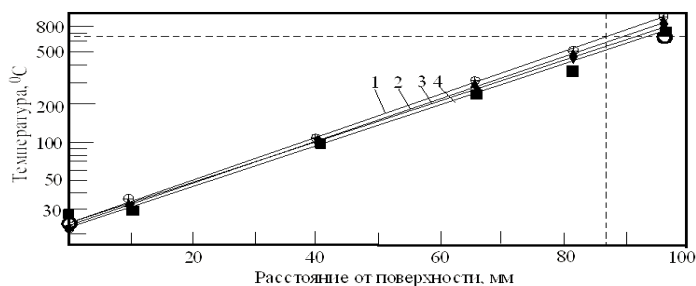
а – 40%; *б* – 60%; *в* – 80%; *г* – 100%

Рисунок 10 - Картина распределения эквивалентного напряжения в заготовке при прессовании в устройстве для измельчения зерна

На основе полученных результатов численного моделирования установлено, что на первом этапе прессования и начальном моменте деформирования эквивалентные напряжения локализуются в верхней и нижней частях боковой поверхности заготовки (рисунок 10, *а*, *б*), с увеличением обжатия акцент локализации эквивалентных напряжений переносится от боковой поверхности к центральной части заготовки (рисунок 10, *в*) и в конце обжатия полностью сосредотачивается под верхним и нижним пуансоном (рисунок 10, *г*).

В четвертой главе представлены результаты исследований, направленные на корректировку технологического процесса литья слитков и производства профилей из сплава АД31. Поскольку первым этапом в технологической цепи стоит получение литых заготовок, то необходимо было уточнить некоторые вопросы, касающиеся их отливки, условий кристаллизации: температуры расплава (перегрев), времени выдержки в перегретом состоянии, скорости охлаждения.

Изучено влияние температуры перегрева расплава, времени выдержки и скорости охлаждения на деформируемость сплава при изготовлении профилей разного назначения. Исследовано влияние перегрева расплава на распределение температуры по глубине отливки и ее сопротивление деформации сжатия. С этой целью в процессе охлаждения каждого слитка контролировалась температура с помощью 6 термпар. Результаты измерений показаны на рисунке 11. Распределение температур по объему отливки в процессе кристаллизации качественно не меняется. Меняется лишь угол наклона, численное значение которого определяется коэффициентом пропорциональности η .



1 – 840 °C, 2 – 810 °C, 3 – 770 °C, 4 – 750 °C

Рисунок 11 – Распределение температур по глубине отливки

Влияние величины перегрева на деформируемость сплава исследовалась на образцах, осаженных в условиях одноосного сжатия. Величина единичного обжатия была постоянной и равнялась 10%. При таком сжатии образцы не разрушались, что давало возможность их дальнейших микроструктурных исследований.

На рисунке 12 показаны экспериментальные результаты напряжения от температуры перегрева при деформировании в условиях одноосного сжатия. Полученная зависимость в простых координатах представлена в виде прямой линии и описана простым алгебраическим уравнением. Изучено влияние температуры перегрева и времени выдержки на механические свойства (рисунок 13).

Этот факт может быть использован в технологическом процессе изготовления профилей разного назначения. Экспериментальные плавки в лабораторных условиях проводились в атмосфере, что соответствует рабочим условиям. Причиной роста прочностных характеристик и снижением пластичности с повышением температуры перегрева может быть захват расплавом водорода из атмосферы.

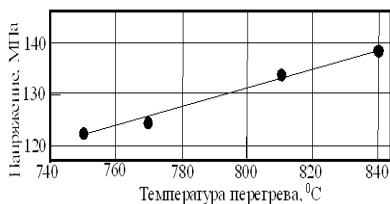


Рисунок 12 - Зависимость напряжения от температуры перегрева при деформировании сплава АД31 в условиях одноосного сжатия на 10%

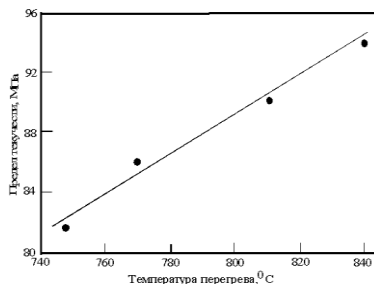


Рисунок 13 - Зависимость предела текучести от температуры перегрева алюминиевого сплава АД31

Вышеописанные эксперименты были проведены при одинаковом времени выдержки, равном 30 мин. Следовало выяснить, как влияет время выдержки на прочность и пластичность в перегретом состоянии. Величина деформации сжатия также была выбрана равной 10%. С увеличением времени выдержки расплава в перегретом состоянии его сопротивление деформации сжатия возрастает. Это свидетельствует о его упрочнении. В графическом виде опытные данные показаны на рисунке 14.

Определено влияние режимов охлаждения при литье сплава АД31 на его механические свойства. Экспериментальные плавки велись при разных режимах охлаждения. На первом этапе приготовленный материал разогревался до температуры плавления с последующим перегревом расплава до температуры 750 °C.

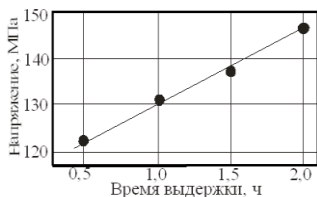


Рисунок 14 – Зависимость напряжения от времени выдержки расплава в перегретом состоянии при 770 °C

Скорость нагрева составляла 20 – 25 град/мин. Из плавков приготавливались образцы для механических испытаний. Из каждой отливки приготавливали по 8 образцов. Установлен рост пластичности с одновременным снижением предела текучести и временного сопротивления. Такое явление может быть объяснено тем, что с увеличением скорости охлаждения зеренная структура измельчается, приводя к наблюдаемому поведению исследованных параметров. В реальных условиях производства в процессе прессования профилей материал испытывает

длина зеренная структура измельчается, приводя к наблюдаемому поведению исследованных параметров. В реальных условиях производства в процессе прессования профилей материал испытывает

деформации сжатия. На рисунке 15 показаны зависимости напряжения от величины пластической деформации сжатия.

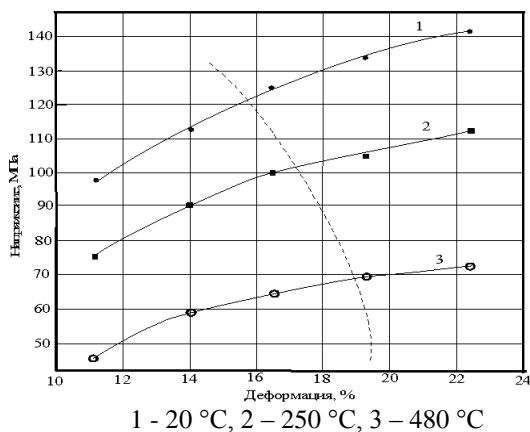


Рисунок 15 – Зависимость напряжения от величины деформации образцов из алюминиевого сплава АД31 (обобщенный график)

Поэтому предстояло провести экспериментальную проверку в условиях, приближенных к рабочим. Эта серия экспериментов была проведена на цилиндрических образцах после их старения в течение 150 часов и последующей гомогенизации. График характеризует сопротивление деформированию. Он также дает наглядное представление о том, что качественный вид зависимостей не меняется, но с ростом температуры испытания в исследованном интервале деформаций сопротивление деформированию уменьшается. Предложена модель контроля качества литых заготовок и производимой продукции. Анализ оборудования привел к предположению, что контроль на производстве можно вести по графикам нагрузки на пресс-штемпеле агрегата производства профилей. В качестве примера один из графиков приведен на рисунке 16. График построен в относительных координатах. Максимальная допустимая нагрузка на пресс-штемпеле была принята за единицу, а реальная рабочая нагрузка была на нее нормирована. Время также было поделено на интервалы. Расчетное время прессования, которое определялось исходя из возможности использования оборудования на 100% (на оси ординат это единица), и, следовательно, максимальная скорость прессования, делилась на 10 равных интервалов. На графике можно выделить три условные стадии. К числу общих закономерностей следует отнести рост нагрузки на стадии I. Нагрузка

на пресс-штемпеле растет до момента начала прессования профиля, обозначенного точками *A*.

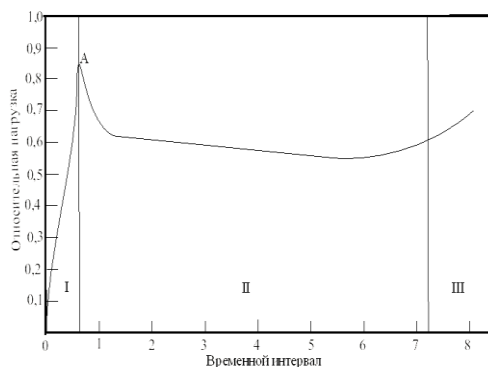


Рисунок 16 – График изменения нагрузки на пресс-штемпеле при прессовании профиля одного типа: деталь № 1

С началом прессования нагрузка на пресс-штемпеле падает до некоторого значения и в дальнейшем ведет себя не однозначно: падает на всем протяжении стадии II, имеет скачкообразные изменения. На стадии III наблюдается увеличение нагрузки. Отметим, что в точке *A* нагрузка различная. Снижение относительной нагрузки на пресс-штемпеле в начале стадии II может быть объяснено температурным эффектом. Заготовка перед прессованием разогревается до температуры 450–490 °С. За счет запасенной энергии пластической деформации происходит дополнительный саморазогрев сплава до 520–560 °С. С ростом температуры прочностные характеристики падают, а пластичность металлов и сплавов возрастает. На графике (рисунок 16) интервал II характеризуется неравномерной нагрузкой, которая также объясняется неодинаковостью структуры даже по объему заготовки. Это свидетельствует о различиях в структуре алюминиевого сплава разных плавов. Увеличение нагрузки на пресс-штемпеле в области III, вероятно, связано с деформационным упрочнением и динамическим возвратом, сопровождаемым ростом зерна. С точки зрения сохранения качества выпускаемой продукции начало стадии III следует принимать за команду к прекращению прессования и отправке пресс-остатков на вторичную переработку. По мере роста скорости прессования вид начального участка в максимуме трансформируется от более гладкой кривой, с большим радиусом закругления, к почти острому пику. В данный момент можно только предположить, что подобное поведение

связано с особенностями формирования микроструктуры при разных скоростях пластической деформации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований решена актуальная задача в области математического моделирования технологических процессов и методов изготовления деталей и изделий машиностроения. По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что структура литого алюминиевого сплава АД31 неоднородна по объему, различна по химическому составу основных компонентов, среднему размеру зерна, прочностным и пластическим характеристикам.

2. Выявлено, что в данном сплаве после кристаллизации интенсивно протекает процесс старения, сопровождающийся изменением прочностных и пластических характеристик. Записаны уравнения, устанавливающие взаимосвязь между временем старения и кратковременными механическими свойствами, такими как: предел текучести, временное сопротивление, запас пластичности.

3. Определена динамика процесса упрочнения сплава при пластической деформации. Показано, что зависимость предела текучести от величины накопленной пластической деформации подчиняется степенному уравнению.

4. Установлен характер распределения температур по глубине заготовки при кристаллизации. Получено уравнение, позволяющее рассчитать температуру в любой точке в радиальном направлении от центра заготовки к охлаждаемой поверхности. Из выведенного уравнения следует, что для уменьшения градиента температур необходимо отливать заготовки меньшего размера. Показано, что рост температуры перегрева и времени выдержки расплава в перегретом состоянии приводит к увеличению сопротивления деформированию образцов, а рост скорости охлаждения – к ее снижению.

5. Определены условия получения профилей, когда вероятность появления продукции низкого качества и брака является минимальной. Предложен беззатратный способ контроля качества изготавливаемой продукции на базе анализа графиков, отражающих условия экструзии профилей в заводских условиях.

6. На основании анализа экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования предложены методы предварительного формирования структуры для улучшения технологических свойств алюминиевого сплава АД31 и пресс-изделий.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. **Удербаета, А.Е.** Валок изогнутой формы для прокатки непрерывнолитых слитков. /Машеков С.А., Секербек А.М., Абсадыков Б.Н.// Труды 2-й Международной научно-практической конференции молодых ученых. Часть 2. Алматы, 2002

2. **Удербаета, А.Е.** Напряженно-деформированное состояние металла непрерывнолитых слитков при изгибе в валках изогнутой формы [Текст] / Машеков С.А., Секербек А.М., Абсадыков Б.Н.// Труды 2-й Международной научно-практической конференции молодых ученых. Часть 2. Алматы, 2002

3. **Удербаета, А.Е.** Разработка новой технологии получения наноструктурированных полуфабрикатов и изделий. / [Текст] С.А.Машеков, А.Е.Нуртазаев // Материалы III Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения».- Алматы: Эверо, 2009. – Т.2. - С. 225-229.

4. **Удербаета, А.Е.** Проблемы производства сложных профилей из алюминиевых сплавов в Республике Казахстан. [Текст]/Чумаков Е.В., Машеков С.А.//Вестник КазАТК им. М. Тынышбаева. – Алматы.: №5(60) 2009, - С. 201-204.

5. **Удербаета, А.Е.** Проблемы изготовления сложных профилей из алюминиевого сплава АД31. [Текст]/Е.В.Чумаков, С.А.Машеков//Научно-технический сборник «Новости науки Казахстана». Выпуск 4 (103) 2009. – С. 44-51.

6. **Удербаета, А.Е.** Экспериментальное исследование процессов старения и деформационного упрочнения деформируемого алюминиевого сплава АД31. [Текст] / С.А. Машеков, Е.В. Чумаков // Труды XI Международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедеятельности».-Алматы: КазНТУ, 2009.-Т.I.- С.109-110.

7. **Удербаета, А.Е.** Исследование процесса старения алюминиевого сплава АД31. [Текст]/Е.В.Чумаков, С.А.Машеков // Труды XI Международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедеятельности». - Алматы: КазНТУ, 2009.-Т.III.- С.59-63.

8. **Удербаета, А.Е.** Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при деформировании в специальном устройстве (сообщение 1). [Текст]/С.А.Машеков, А.Е.Нуртазаев, А.С.Машекова // Вестник КазНТУ им.К.И.Сатпаева - Алматы, №1(77)2010. - С. 80-83.

9. **Удербаета, А.Е.** Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при деформировании в специальном устройстве (сообщение 2). [Текст] / С.А.Машеков, А.Е.Нуртазаев, А.С.Машекова // Вестник КазНТУ им.К.И.Сатпаева - Алматы, №2(78)2010. - С. 108-112.

10. **Удербаета, А.Е.** Численное моделирование методом конечных элементов НДС заготовки при деформировании в специальном устройстве (сообщение 3). [Текст] / С.А.Машеков, А.Е.Нуртазаев, А.С.Машекова // Вестник КазНТУ им.К.И.Сатпаева - Алматы, №4(80)2010. - С. 201-203.

11. **Удербаета, А.Е.** Старение сплава АД 31. [Текст] / Удербаета А.Е// Вестник КазАТК им. М.Тынышбаева – Алматы, №3(64) 2010, - С. 286-290.

12. **Удербаета, А.Е.** Влияние старения пластической деформации на механические свойства и структуру алюминиевого сплава АД 31 [Текст]/Удербаета А.Е//Вестник КазГаса - Алматы, №3(37) 2010. - С. 122-128.

13. **Удербаета, А.Е.** Деформационное упрочнение алюминиевого сплава АД31 при обработке давлением. [Текст]/С.А.Машеков, Е.В.Чумаков // Труды Международной конференции «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии». КазНТУ им. К.И. Сатпаева. -Алматы:, 2010.- С.190-193.

14. **Удербаета, А.Е.** Влияние температуры перегрева и времени выдержки на механические свойства литых заготовок из алюминиевого сплава АД31. [Текст]/А.Е. Удербаета /Труды Первой Международной научно-технической конференции «Новое в станкостроении, материаловедении и автоматизированном проектировании машиностроительного производства». КазНТУ им. К.И. Сатпаева - Алматы, 2010.- С.300-303.

15. **Удербаета, А.Е.** Особенности производства профилей из алюминиевых сплавов. [Текст] / Е.П.Орлова, Е.В.Чумаков/ / Труды Первой Международной научно-технической конференции «Новое в станкостроении, материаловедении и автоматизированном проектировании машиностроительного производства». КазНТУ им. К.И. Сатпаева - Алматы, 2010. - С.290-292.

16. **Удербаета, А.Е.** Комплексные исследования алюминиевого сплава АД 31 для производства профилей различного назначения. [Текст]/Е.В.Чумаков, Н.К. Смагулова // Труды Первой Международной научно-технической конференции «Новое в станкостроении, материаловедении и автоматизированном проектировании

машиностроительного производства». КазНТУ им. К.И. Сатпаева - Алматы: 2010. - С.293-296.

17. **Удербаета, А.Е.** Деформационное упрочнение алюминиевого сплава АД31 при обработке давлением. [Текст]/Удербаета А.Е.//Вестник НАН РК –Алматы: №4, 2010. – С. 66-69.

18. **Удербаета, А.Е.** Влияние старения на прочностные и пластические свойства алюминиевого сплава АД31 [Текст]/А.Е.Удербаета //Наука и новые технологии - Бишкек, №3 2011 – С. 26-28.

19. **Удербаета, А.Е.** Алюминиевый сплав АД31 как конструкционный материал для производства профилей. [Текст]/А.Е.Удербаета. Наука и новые технологии - Бишкек, №3 2011 – С. 39-41.

20. **Удербаета, А.Е.** Эволюция механических свойств алюминиевого сплава АД31 в процессе производства профилей. [Текст]/А.Е.Удербаета//Известия вузов - Бишкек, №3 2011 – С. 44-48.

21. **Удербаета, А.Е.** Влияние уровней пластической деформации на механические свойства алюминиевого сплава АД31[Текст]/А.Е.Удербаета//Известия вузов - Бишкек, №3 2011 №3 2011 – С. 52-55

22. **Удербаета, А.Е.** Влияние режимов плавления на качество заготовок из алюминиевого сплава АД31 [Текст]/XVI international scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering/А.Б.Телешева, А.Т.Турдалиев, Е.В.Чумаков, Х.Дыя//Series: Monografie Nr 48, Częstochowa – 2015. - С. 71-78

23. **Удербаета, А.Е.** Исследование процесса старения алюминиевого сплава АД31.[Текст]/А.Б.Телешева, А.Т.Турдалиев, М.А. Скорикова, Е. В. Чумаков, Х.Дыя // XVI international scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering/- Series: Monografie Nr 48, Częstochowa – 2015. - С. 79-84

24. **Uderbayeva, A. E.** Quality control of sections in the process of Their extrusion Int. J. Chem. Sci. [Текст]/А. В. Telesheva*, А. Т. Turdalyev, Henryk Dyja, Ye. V. Chumakov, and E. A. Tussupkaliyeva // Udai-pur India - 13(2), 2015, 1076-1084, www.sadgurupublications.com

25. **Удербаета, А.Е.** Исследование процесса старения алюминиевого сплава АД31. [Текст] // Труды XVIII Международной научно-технической конференции «Новое в технике, безопасности жизнедеятельности».- Москва:, 2016.-Т.І.- С.269-273.

Удербаета Асемгуль Еркинбековнанын «Иштетүү режимдерин башкаруунун негизинде алюминий эритмелеринен жасалган пресс-өнүмдөрдү өндүрүүнүн эффективдүүлүгүн жогорулатуу» деген темадагы, адистиги: 05.02.08 «Машина куруунун технологиялары» боюнча техника илимдеринин кандидаттык илимий даражасын изденип алууга диссертациясы
КЫСКАЧА МАЗМУНУ

Ачкыч сөздөр: агуу чеге, убактылуу каршылык, ийкемдүүлүк, даярдык бөлүк, деформациялык бекемдөөнү, ныктоо.

Изилдөө объекти: алюминий эритмелерин ныктоонун технологиясы.

Изилдөө предмети: АД 31 алюминий эритмесинин үлгүлүү.

Илимий иштин максаты: алюминий эритмесинен пресс-өнүмдөрдү даярдоонун технологиясын, аларды өндүрүүнүн эффективдүүлүгүн жогорулатуу үчүн жакшыртуу.

Изилдөөнүн методу жана аппаратурасы: Усулдар катуу деформацияланган нерселердин механикасынын теориясын, математика жана системалык анализди колдонууга негизделген. Теориялык эсептөөлөрдү жүргүзүү үчүн Autodesk Inventor программалык комплекси колдонулду. Металлографиялык анализ ЕС МЕТАМ РВ-21-1 оптикалык микроскопто 200 жана 500 эсе чоңойтуу менен жүргүзүлдү.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыгы: ныктоодо даярдык бөлүктүн структурасын даярдоо технологиясы жакшырылды, эскирүү процессинен кийинки механикалык касиеттерин, гомогендештирүүчү күйгүзүүнү жана деформациялык бекемдөөнү эске алуу менен АД31 эритмесинен профилдерди өндүрүү мүмкүнчүлүктөрүн баалоонун схемасы сунушталды, жумуштун режимин автоматтык түрдө башкаруусу менен өнүмдөрдү ныктоо үчүн атайын түзүлүш иштелип чыкты. Куюуда температуранын жана куйманын кесилиши боюнча химиялык түзүмдүн, дандардын өлчөмдөрүнүн жана механикалык касиеттердин таралышынын мыйзам ченемдүүлүктөрү аныкталды; эскирүүнүн жана бекемдөөнүн динамикасы айкындалды. Температуранын жана аралыктын куйманын бетинен, кыска мезгилдүү механикалык мүнөздөмөлөрүнөн жана эскирүү убакытынан, агуу чегинин жыйналган деформациянын чоңдугунан математикалык көз карандылыгы түзүлдү; крест түрүндөгү түзүлүштө өнүмдөрдү даярдоодо сандык маанилер алынды жана чыңалуу-деформация абалынын өзгөрүшүнүн мыйзамченемдүүлүктөрү аныкталды.

Колдонуу даражасы: алынган жыйынтыктардын пресс-өнүмдү иштетүүдөгү апробациясы ТОО МАССАГЕТ ПЛЮС ишканасында болду.

Колдонуу областы: машина куруу ишканаларында пресс-өнүмдү иштетүү технологиясы.

РЕЗЮМЕ

диссертации Удербасовой Асемгуль Еркинбековны на тему:
«Повышение эффективности производства пресс-изделий из алюминиевых сплавов на основе управления режимами обработки» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения»

Ключевые слова: предел текучести, временное сопротивление, пластичность, заготовка, деформационное упрочнение, прессование.

Объект исследования: технология прессования алюминиевых сплавов.

Предмет исследования: Образцы алюминиевого сплава АД 31

Цель работы: совершенствование технологии изготовления пресс-изделий из алюминиевых сплавов для повышения эффективности их производства.

Методы исследования и аппаратура: Методика базируется на использовании теории механики твердого деформированного тела, системного анализа и математической статистики. Для теоретического расчета использованы программные комплексы Autodesk Inventor. Металлографический анализ был проведен на оптическом микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-21-1 при увеличениях 200 и 500 крат.

Полученные результаты и их новизна: на основе проведенных исследований усовершенствована технология подготовки структур заготовок при прессовании. Предложена схема оценки возможности производства профиля из сплава АД31 с учетом механических свойств после старения, гомогенизирующего отжига и деформационного упрочнения, разработано специальное устройство для прессования изделий с автоматическим управлением режимами работ, установлен профиль распределения температур при отливке и закономерности распределения химического состава, величин зерен и механических свойств по сечению слитка; выявлена динамика старения и упрочнения. Составлены уравнения взаимосвязи температуры и расстояния от поверхности слитка, кратковременных механических характеристик и времени старения, предела текучести от величины накопленной деформации; установлены закономерности изменения напряженно-деформируемого состояния при изготовлении изделия в крестообразном устройстве.

Степень использования: полученные результаты апробированы при обработке пресс-изделий на предприятии ТОО МАССАГЕТ ПЛЮС.

Область применения: технология обработки пресс-изделий на машиностроительных предприятиях.

SUMMARY

Uderbayeva Asemgul Erkinbekovny's theses on a subject:
"Increase in production efficiency of press products from aluminum alloys on the basis of steering of the processing modes" for a degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.02.08 – "Technology of mechanical engineering"

Keywords: fluidity limit, temporary resistance, plasticity, preparation, deformation hardening, pressing.

Object of probe: technology of pressing of aluminum alloys.

Subject of the study: samples of aluminum alloy AD 31.

Work purpose: improvement of manufacturing techniques of press products from aluminum alloys for increase in efficiency of their production.

Methods of probe and equipment: The technique is based on the theory of solid mechanics of the deformed body, mathematics and systems analysis. For the theoretical calculation used software packages Autodesk Inventor. Metallographic analysis was conducted on the optical microscope EU METAM PB-21-1 at magnifications of 200 and 500 times. For processing the results of experiments using the apparatus of mathematical statistics

The received results and their novelty: on the basis of the conducted researches the technology of preparation of structures of preparations when pressing is improved. The scheme of assessment of a possibility of production of a cross-section from AD31 alloy taking into account mechanical properties after aging, the homogenizing annealing and deformation hardening is offered, the special device is also developed for pressing of computer-controlled products by the modes of works. On the basis of imitating experimental data the cross-section of distribution of temperatures when casting is established and consistent patterns of distribution of the chemical composition, sizes of grains and mechanical properties on ingot section are determined; dynamics of aging and hardening is experimentally revealed. The mathematical equations of interrelation of temperature and distance from a surface of an ingot, short-term mechanical characteristics and time of aging, a fluidity limit from the size of the saved-up deformation are worked out; quantitative data are obtained and consistent patterns of change of an intense and deformable state at production of a product in the crosswise device are determined.

Extent of use: the received results are approved when processing press products at the MASSAGET PLUS LLP enterprise.

Scope: technology of processing of press products at machine-building enterprises.