



**ГОЛОВКИНА Марина Геннадьевна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ НА  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО ОБЪЕМУ  
ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** **Галкин Виктор Иванович**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Технология обработки металлов давлением им. проф. А.И. Колпашникова» МАИ (НИУ)

**Официальные оппоненты:** **Лавриненко Владислав Юрьевич** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана)»

**Нуждин Виталий Николаевич** кандидат технических наук, менеджер по новым технологиям дирекции по стратегии и развитию бизнеса АО «Аркиник СМЗ».

**Ведущая организация:** ОАО «ВИЛС»

Защита диссертации состоится 15 февраля 2017 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук по адресу: г. Москва, Ленинский пр. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru>. Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334 г. Москва, Ленинский проспект 49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: [kalash.ds@mail.ru](mailto:kalash.ds@mail.ru)

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук

 Калашников И. Е.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Развитие техники и технологий неразрывно связано с созданием новых и совершенствованием имеющихся научных подходов проектирования и изготовления полуфабрикатов, получаемых методами обработки металлов давлением (ОМД). В настоящее время одной из основных задач, стоящих перед разработчиками и производителями, является обеспечение прочности и надежности конструкции при одновременном снижении ее веса, что требует создания научных методов разработки промышленных технологий, которые позволят повысить эксплуатационные свойства конструкционных материалов.

В силу того, что процессы горячей ОМД являются нестационарными, распределение напряженно-деформированного состояния (НДС) и температур по объему заготовки неравномерно, что приводит к анизотропии механических свойств. Из-за анизотропии свойств полуфабрикаты, получаемые методами ОМД, чувствительны к направлению приложенной нагрузки и оказывают неравномерное сопротивление деформации при силовом воздействии. В результате, элементы конструкции имеют различную прочность. При классическом подходе расчета надежности и работоспособности изделия это не учитывается, поскольку механические свойства материала задаются в виде усредненной величины по всему объему. Для возможности прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабриката и увеличения эксплуатационной надежности конструкции необходимо установить связь между параметрами обработки и формирующимися механическими свойствами материала и получить не только качественные, но и количественные показатели.

Появление систем инженерного анализа дало возможность количественно оценивать значения НДС, температуры, скорости деформации и других параметров технологического процесса. Однако при исследовании процессов горячей пластической деформации необходимо знать, что будет со свойствами готового полуфабриката, которые зависят от ряда факторов:

химического состава материала, условий деформирования, вида и режимов последующей термической обработки. Механические характеристики формируются не только в процессе деформирования, но и при охлаждении после горячей деформации, в результате которого возможно прохождение релаксационных процессов. Следовательно, для прогнозирования распределения свойств по объему полуфабрикатов требуется информация не только о характере распределения НДС, но и о его взаимосвязи с режимом последующей термообработки и процессами, происходящими в металле в результате остывания после деформации.

Настоящая работа посвящена разработке методики прогнозирования механических характеристик полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, изготавливаемых методами ОМД. Возможность управления пластическим течением металла позволит получать изделия с заданными свойствами. В связи с этим, тема диссертационной работы является актуальной.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью данной работы является разработка методики и программного обеспечения для прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, получаемых методами горячей обработки металлов давлением.

В соответствии с поставленной целью, требуется решение следующих задач:

1. Исследование влияния технологических параметров горячего деформирования и охлаждения на механические свойства алюминиевых сплавов.
2. Математическое моделирование процесса горячего деформирования и последующего охлаждения образцов из алюминиевых сплавов в соответствии с задаваемыми режимами для определения количественных показателей напряженно-деформированного состояния и распределения температур.
3. Установление распределения механических свойств по объему

полуфабрикатов из алюминиевых сплавов при горячей деформации с помощью методов физического и математического моделирования в зависимости от технологических параметров обработки и охлаждения.

4. Формирование базы данных, отражающей зависимость механических свойств алюминиевых сплавов от параметров процесса горячего формоизменения и последующего охлаждения.

5. Разработка методики прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, изготавливаемых методами горячей обработки металлов давлением.

6. Создание программного обеспечения для прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабрикатов из алюминиевых сплавов после пластического деформирования на базе интегрированных результатов конечно-элементного анализа и испытаний механических свойств.

7. Опытная проверка разработанной методики и программного приложения.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана методика прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, изготавливаемых методами горячей обработки давлением, основанная на совмещении методов физического и математического моделирования и учете объединенного влияния температуры, деформации и скорости охлаждения на величину механических свойств материала.

2. С помощью методов физического и математического моделирования установлены зависимости между показателями механических свойств алюминиевых сплавов АМг6 и Д1 и параметрами технологического процесса горячего деформирования в диапазонах изменения интенсивности деформации от 0,2 до 1,5 (относительная степень деформации составила 0-75%), температуры нагрева перед деформацией от 380 °С до 520 °С и скорости охлаждения после формоизменения от 0,1 °С/с до 0,6 °С/с.

### **Практическая значимость работы:**

1. На базе разработанной методики создано программное приложение к современным САЕ-системам, позволяющее прогнозировать распределение по сечению полуфабрикатов, получаемых методами горячей ОМД, следующие механические свойства: предел прочности, предел текучести и твердость.

2. Материалы работы внедрены в учебный процесс МАИ (НИУ) при подготовке бакалавров по дисциплине «Моделирование процессов и систем».

**Достоверность результатов** подтверждается применением апробированных методов исследования, соответствием результатов компьютерных прогнозов, базирующихся на разработанных моделях, и экспериментальных данных.

Основные положения и результаты работы обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Применение ИПИ-технологий в производстве», Москва, 2012г; Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2013г, 2014г, 2016г; Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством и сертификация», Москва, 2014г, 2015г; научно-технической конференции «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов», Москва, 2016г.

Основные положения работы опубликованы в 12 работах, в том числе в научных журналах и изданиях, определенных ВАК - 3.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и библиографического списка, содержащего 98 наименований. Материал работы изложен на 184 страницах, содержит 94 рисунка, 25 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель работы и содержание поставленных задач исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены процессы, сопровождающие горячую пластическую деформацию, и их влияние на механические свойства полуфабрикатов. Показано, что механические свойства зависят от химического состава, условий деформирования, НДС, вида и режима последующей термообработки.

Выполнен обзор физических процессов, ответственных за упрочнение и разупрочнение. Упрочнение при пластической деформации вызвано увеличением плотности дислокаций, блокообразованием, искривлением плоскостей скольжения и происходит до достижения определенного уровня энергии, после которого включаются процессы релаксации – динамический возврат, полигонизация и рекристаллизация.

Рассмотрены основные методы решения задач течения сплошной среды, проанализированы их достоинства и недостатки. Отмечено, что эффективным является применение систем инженерного анализа, базирующихся на методе конечных элементов.

САЕ-системы, применяемые для анализа пластического течения материалов, позволяют получать большой объем информации об изучаемом процессе: напряженно-деформированное состояние, картины распределения температур, скоростей деформаций, выявление дефектов обработки. Однако в САЕ-системах НДС никак не связано с механическими свойствами, что не позволяет использовать данные программы для прогнозирования прочностных характеристик в готовом полуфабрикате с учетом времени и полноты прохождения рекристаллизационных процессов в результате охлаждения после пластической деформации. В настоящее время основным критерием выбора технологических параметров обработки является получение полуфабриката заданной формы без дефектов обработки и высокая производительность труда, практически отсутствуют какие-либо рекомендации по оценке влияния технологических режимов на распределение механических свойств по объему готового изделия.

На основе анализа литературных данных обосновывается актуальность

исследований, связанных с разработкой методик прогнозирования механических свойств полуфабрикатов, получаемых горячей ОМД.

**Вторая глава** посвящена описанию применяемых материалов и методик проведения испытаний.

Исследования проводились на алюминиевых сплавах Д1 и АМг6. Образцы из данных сплавов нагревались в электрической муфельной печи с нагревательными тэнами. Деформирование заготовок осуществлялось на двухколонном прецизионном прокатном стане 300/290 Joliot.

Испытания механических свойств осуществлялись на универсальной испытательной машине Instron модели 5982. Твердость по Бринеллю измерялась на твердомере марки ТН550. Нагрузка для сплавов Д1 и АМг6 составляла 100 кг. Образцы для контроля структуры полировались на шлифовально-полировальной машине Polisher AP 32 combo и травились раствором Келлера. Изучение макро- и микроструктуры осуществлялось на микроскопе Carl Zeiss Axio Imager.

Для анализа напряженно-деформированного состояния, распределения полей температур и получения количественных значений интенсивности деформации проводилось моделирование процесса деформирования и последующего охлаждения образцов с использованием программного комплекса DEFORM.

Обработка результатов эксперимента проводилась с использованием дисперсионного и регрессионного анализов.

**В третьей главе** разработана методика построения математической модели прогнозирования свойств полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, получаемых методами ОМД, учитывающая влияние неоднородного НДС, температуры и скорости охлаждения после деформации.

В качестве варьируемых параметров технологического процесса выбраны степень деформации, температура и скорость охлаждения после обработки. Для снижения общего количества экспериментов изготавливались клиновые образцы из сплавов Д1 и АМг6 под последующую



деформацию продольной прокаткой. Это позволило получить заготовку с равномерным распределением степени деформации по ее длине от 0 до 75% (рис.1). Клиновые образцы нагревались до температур: 380, 450, 520 °С.

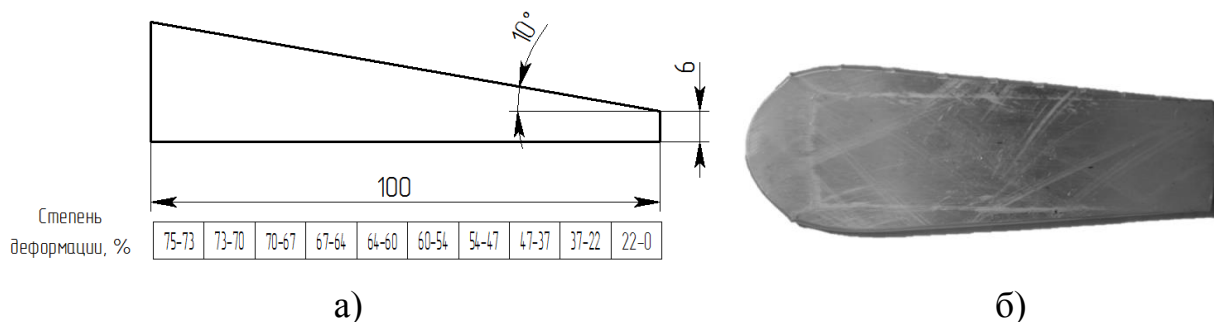


Рис.1. Клиновой образец

а) распределение деформаций по длине; б) после прокатки

Экспериментальное моделирование температурно-скоростных режимов охлаждения различных зон массивной заготовки проводилось с помощью тепловых изоляторов различной мощности – стальных плит толщиной 10 мм. Плиты нагревались совместно с клиновыми образцами и применялись в качестве изоляторов тепла при последующем охлаждении деформированных заготовок. Это позволило смоделировать три режима охлаждения массивной заготовки: на воздухе, между 2-мя слоями плит и между 4-мя слоями, что можно интерпретировать как охлаждение внешних, средних и центральных слоев массивной заготовки.

Для численной оценки механических свойств, проводились испытания на разрыв. Для этого из прокатанных клиновых заготовок вырезали по 15 образцов для механических испытаний, в результате которых получены значения механических свойств, в частности, предел текучести и предел прочности. Затем на образцах проводили замер твердости по Бринеллю. На основании полученных данных построены зависимости механических свойств от технологических параметров процесса деформирования.

Анализ диаграмм показывает наличие нескольких процессов, сопровождающих пластическую деформацию. Каждый перегиб на диаграмме

свидетельствует о включение, прекращении или смене одного процесса другим (рис.2).

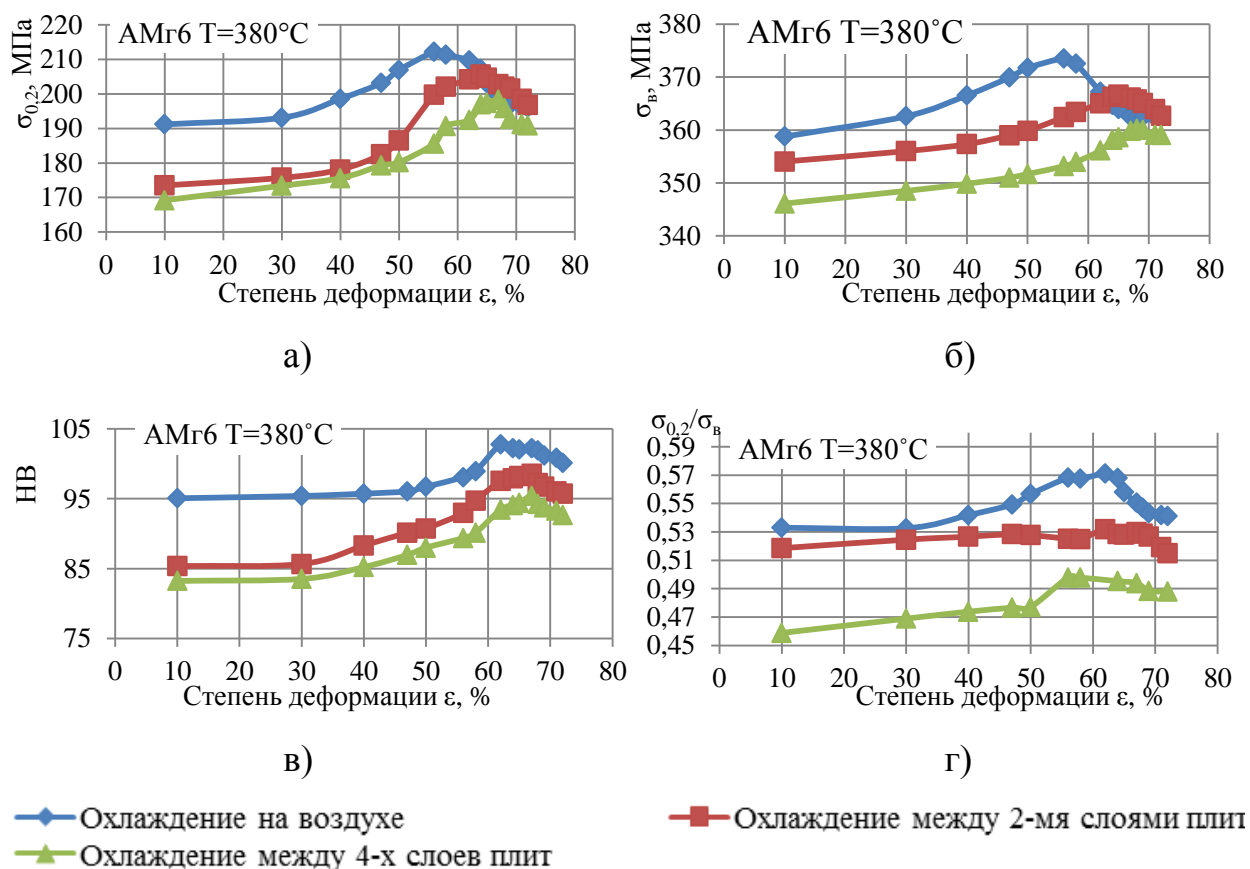


Рис.2. Величина предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (а), предела прочности  $\sigma_B$  (б), твердости HB (в), отношения предела текучести к пределу прочности  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  (г) образцов из сплава АМг6 в зависимости от степени деформации и условий охлаждения. Температура – 380 °С.

Максимальные значения механических свойств в зависимости от температуры деформирования и режима охлаждения для сплава АМг6 приведены в таблице 1 и на рис.3.

Установлено, что наилучшие прочностные характеристики в рассматриваемом диапазоне технологических параметров достигаются при температуре деформирования 380 °С и быстром охлаждении (на воздухе). При увеличении температуры и снижении скорости охлаждения скорость и интенсивность релаксационных процессов увеличивается. В образцах, прокатанных при 520 °С и охлажденных между четырьмя стальными плитами, предел текучести уменьшается на 48,7 МПа (22,9%), предел

прочности – на 30,2 МПа (8,1%), а твердость – на 17,1 МПа (20%) по сравнению с соответствующими характеристиками образцов, обработанных при температуре 380 °С и охлажденных на воздухе.

Таблица 1

Максимальные значения механических свойств образцов из сплава АМгб

Т, °С	$\sigma_{0,2}$ для режимов охлаждения, МПа			$\sigma_b$ для режимов охлаждения, МПа			НВ для режимов охлаждения, МПа		
	воздух	2 плиты	4 плиты	воздух	2 плиты	4 плиты	воздух	2 плиты	4 плиты
380	212,2	205,6	198,3	373,5	366,6	359,8	102,8	98,6	95,4
450	198,7	187,1	186,3	364,1	358,6	353,6	95,1	86,8	85,2
520	178,9	169,8	163,5	354,8	353,3	343,3	93,9	84,5	85,9

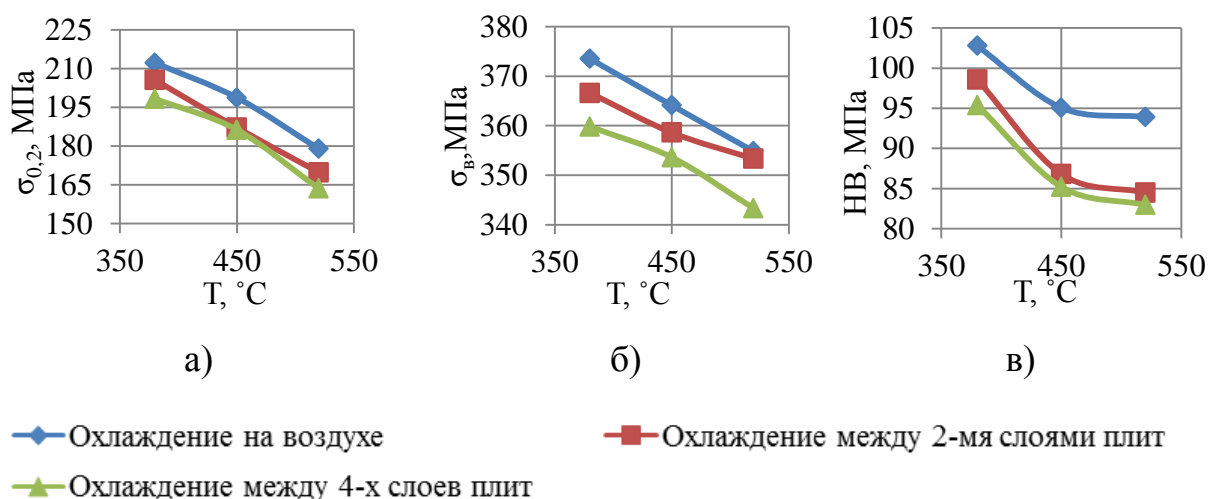


Рис.3. Максимальные значения предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (а), предела прочности  $\sigma_b$  (б) и твердости НВ (в) образцов из сплава АМгб в зависимости от температуры и условий охлаждения.

Изменения механических свойств от температурно-скоростных условий процесса деформирования образцов из сплава Д1 имеют отличный характер от сплава АМгб (рис.4). Так, максимальные значения достигаются при обработке при температуре 520 °С и последующем охлаждении на воздухе.

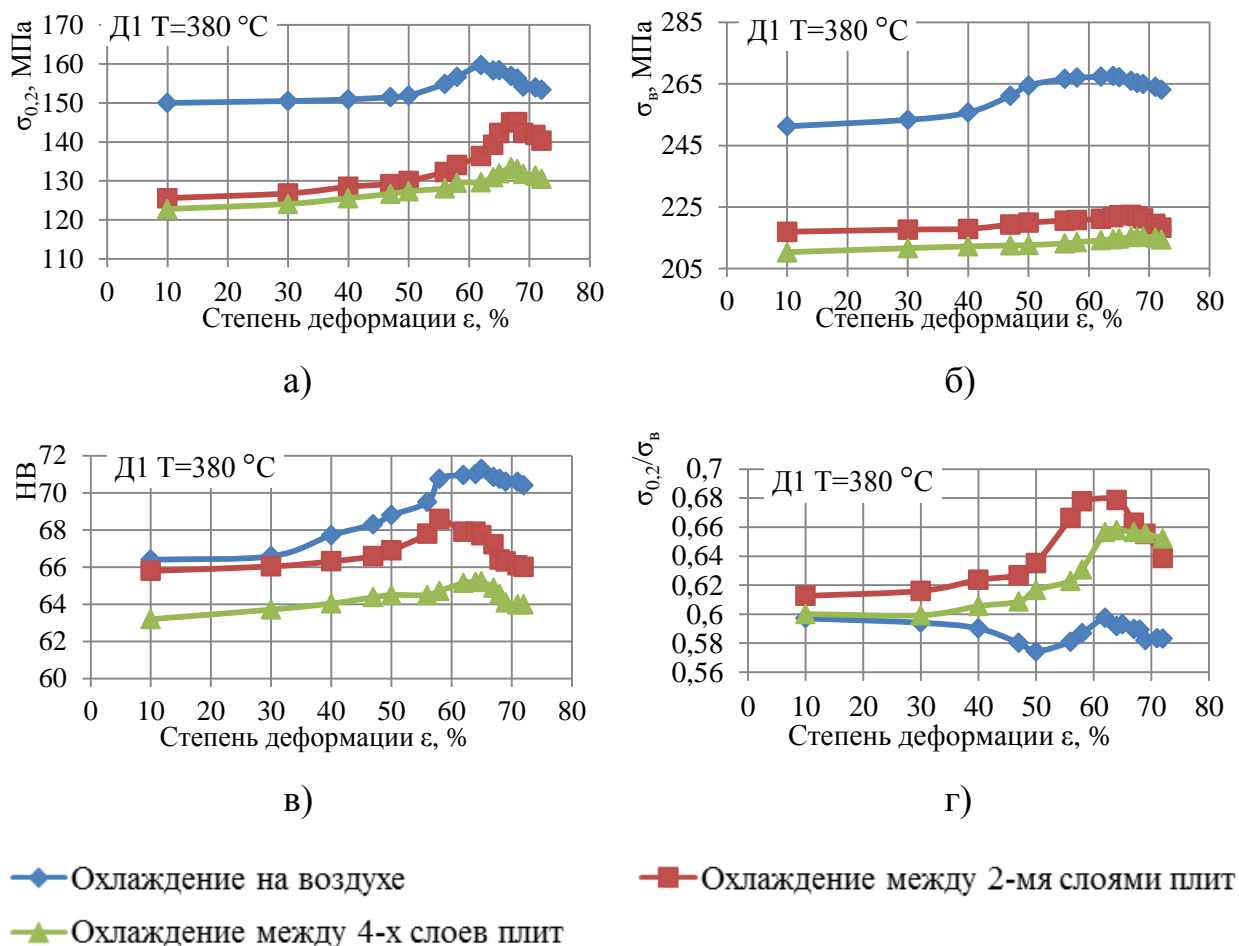


Рис.4. Величина предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (а), предела прочности  $\sigma_B$  (б), твердости НВ (в), отношения предела текучести к пределу прочности  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  (г) образцов из сплава Д1 в зависимости от степени деформации и условий охлаждения. Температура - 380 °С.

Максимальные значения механических свойств в зависимости от температуры деформирования и режима охлаждения для сплава Д1 приведены в таблице 2 и на рис.5.

Таблица 2

Максимальные значения механических свойств образцов из сплава Д1

Т, °С	$\sigma_{0,2}$ для режимов охлаждения, МПа			$\sigma_B$ для режимов охлаждения, МПа			НВ для режимов охлаждения, МПа		
	воздух	2 плиты	4 плиты	воздух	2 плиты	4 плиты	воздух	2 плиты	4 плиты
380	159,7	145,1	133,5	267,6	222,5	215,4	71,3	67,9	65,2
450	180,8	146,9	144,6	266,7	233	228,3	70,4	68,5	66,7
520	225,7	182,3	166,4	343	258,1	264,9	77,6	70,9	70,9

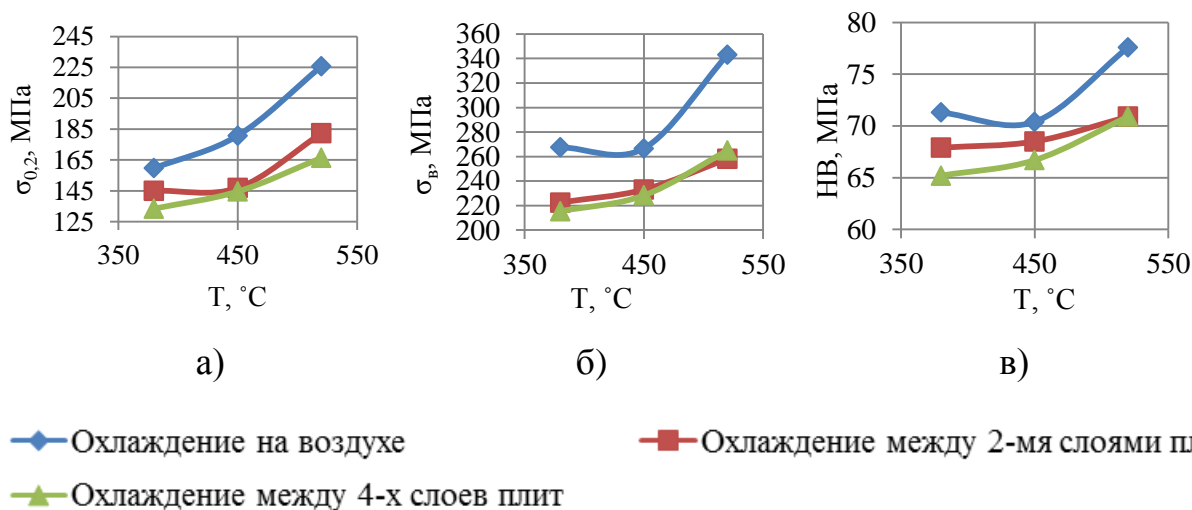


Рис.5. Максимальные значения предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (а), предела прочности  $\sigma_b$  (б) и твердости НВ (в) образцов из сплава Д1 в зависимости от температуры и условий охлаждения.

Сплав Д1 является термически упрочняемым, поэтому механические характеристики изделия увеличиваются с ростом температуры нагрева и упрочнение сплава складывается из двух составляющих: субструктурного упрочнения и дисперсионного твердения.

Аналогичным образом построены и исследованы кривые изменения предела текучести, предела прочности, твердости, отношения предела текучести к пределу прочности для всех образцов из сплавов Д1 и АМг6.

После получения количественных значений механических свойств, проведено математическое моделирование процессов прокатки и охлаждения клиновых образцов для установления картин распределения накопленной деформации, температур и напряжений по сечению заготовки. Математическое моделирование прокатки и охлаждения образцов проводилось в программе DEFORM. Параметры моделирования – контактное трение, геометрия заготовки, температурно-скоростной режим задавались в соответствии с проведенными физическими экспериментами. В результате моделирования получены картины распределения интенсивностей деформаций, напряжений и температур по объему образца.

Для установления функциональных связей между технологическими параметрами и механическими свойствами проводился регрессионный анализ по центральному трехфакторному композиционному плану третьего порядка. С учетом дисперсионного анализа регрессионные модели упрощаются и принимают вид, указанный в таблице 3. Регрессионные модели получены для диапазонов параметров, установленных в настоящей работе.

Таблица 3

Регрессионные модели механических свойств

Сплав		Уравнение регрессии	
АМг6	$\sigma_B$	$y = 355,61 - 4,03x_1 + 4,3x_2 + 2,4x_3 + 2,38x_2^2 - 2,5x_3^2$	(1)
	$\sigma_{0,2}$	$y = 185,66 - 8,61x_1 + 4,23x_2 + 5,16x_3 - 3,91x_3^2$	(2)
	НВ	$y = 84,52 - 2,14x_1 + 1,78x_2 + 2,77x_3 - 0,17x_1x_2 - 0,42x_1x_3 + 0,41x_1x_2x_3 + 3,06x_1^2 + 1,06x_2^2$	(3)
Д1	$\sigma_B$	$y = 226,64 + 14,91x_1 + 16,77x_2 + 2,52x_3 + 3,25x_1x_2 + 6,9x_1^2 + 8,94x_2^2$	(4)
	$\sigma_{0,2}$	$y = 146,36 + 12,46x_1 + 11,1x_2 + 4,14x_3 + 2,68x_1x_2 + 4,87x_1^2 + 6,04x_2^2 - 2,23x_3^2$	(5)
	НВ	$y = 68,22 + 1,45x_1 + 1,47x_2 + 0,43x_3 + 0,15x_1x_2 + 0,46x_1^2 + 0,14x_2^2 - 0,3x_3^2$	(6)

Для верификации полученных моделей изготавливались штамповки деталей «Мембрана» из сплава Д1 (рис.6а) и «Кронштейн» из сплава АМг6 (рис.6б), проводился замер твердости по Бринеллю в точках, указанных на рис. 6 (точки 1-4). Оценку изменения температуры, интенсивности деформаций и скорости охлаждения по сечению проводили согласно результатам моделирования.

С помощью полученных регрессионных моделей осуществлено прогнозирование распределения твердости в указанных точках. В таблице 4 приведены результаты расчета и опытные данные.

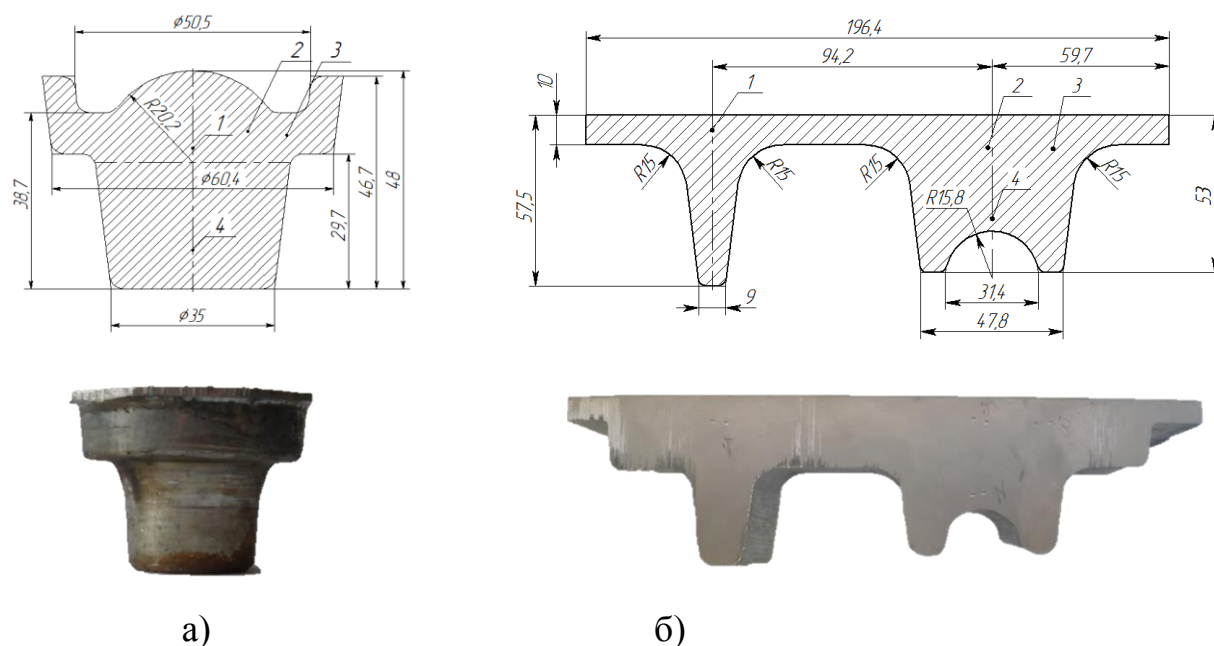


Рис.6. Чертеж штамповки

а) деталь «Мембрана»; б) поперечное сечение детали «Кронштейн»

Таблица 4

Сравнение расчетных и опытных значений твердости

Деталь	№ точки	Т, °С	$\bar{\epsilon}$	V <sub>охл.</sub> , °С/с	НВ, МПа		Откл., %
					Расчет	Опыт	
Мембрана (Д1)	1	380	0,83	0,98	72,18	72,3	0,2
	2	380	1,51	0,97	73,56	74,3	1
	3	380	2,64	0,96	67,9	71,1	4,7
	4	380	0,145	0,98	66,9	70,6	5,5
Кронштейн (АМгб)	1	420	2,06	0,4	97,0	95,5	1,5
	2	420	1,03	0,37	89,7	91,5	2
	3	420	0,92	0,37	88,8	91,2	2,7
	4	420	0,81	0,36	88	88,2	0,2

Установлено, что отклонение аналитических и экспериментальных данных не превышает 5,5%. Таким образом, разработанная математическая модель является адекватной на диапазоне параметров технологического процесса, установленном в данной работе. Точность прогнозирования позволяет говорить о том, что интенсивность деформации может быть применима в качестве параметра для прогнозирования свойств металлических изделий при рассматриваемых температурно-скоростных условиях и последующего охлаждения для различных процессов горячей ОМД.

**Четвертая глава** посвящена разработке автоматизированной системы прогнозирования механических характеристик изделий, получаемых методами ОМД.

Очевидно, что выбор оптимальных параметров технологического процесса обработки с целью получения изделия с заданными механическими свойствами экономически целесообразнее проводить по результатам компьютерного моделирования, а не на основе большого числа экспериментальных данных. Проведенные исследования позволили разработать автоматизированную систему прогнозирования (АСП) распределения механических свойств изделий на базе интегрированных результатов конечно-элементного анализа и опытных данных.

Автоматизированная система прогнозирования является программным приложением к современным САЕ-системам. Уравнение регрессии дает хорошую корреляцию не на всем диапазоне изменения параметров, поэтому разработанная АСП построена на основе реляционной базы данных, где функциональная зависимость  $(T, \varepsilon, \tau) \rightarrow (\sigma_b, \sigma_{0.2}, HB)$  организована в виде взаимосвязанных таблиц базы данных и осуществляется с помощью локальной аппроксимации. Исходная база данных АСП заполнена взаимосвязанными значениями механических характеристик и технологических параметров процесса прокатки и последующего охлаждения клиновых образцов.

Для работы в системе прогнозирования необходимо сначала провести математическое моделирование процесса деформирования и последующего охлаждения. Затем данные из САЕ-системы импортировать в АСП, где после задания необходимых параметров производится расчет механических характеристик изделий. В качестве примера работы в системе автоматизированного прогнозирования выбраны процессы штамповки мембраны из сплава Д1 и кронштейна из сплава АМг6 (рис.6).

На рис.7 представлены результаты расчета механических свойств штамповки мембраны. Полученная картина распределения механических



своих свойств достаточно хорошо коррелируется с опытными данными замера твердости. Обобщенные результаты анализа представлены в таблице 5, 6.

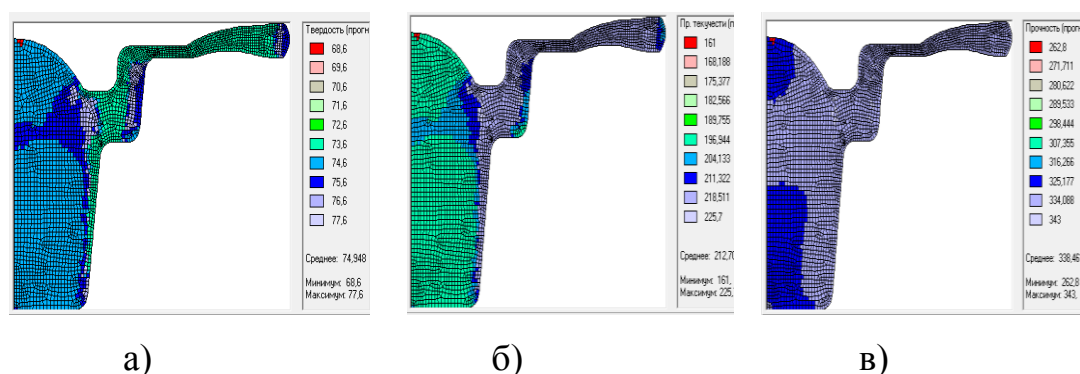


Рис.7. Результаты прогнозирования механических свойств детали «Мембрана». Температура деформирования – 380 °С

а) твердость; б) предел текучести; в) предел прочности

Таблица 5

Сравнение прогнозируемых и опытных значений твердости для штамповки «Мембрана» из сплава Д1

№	380 ° С		Откл., %	450 ° С		Откл., %	520 ° С		Откл., %
	Прогн.	Опыт		Прогн.	Опыт		Прогн.	Опыт	
1	75,8	72,3	4,6	75,5	72,5	3,9	75,1	71,7	4,5
2	76,7	74,3	3,1	77,3	75,4	2,5	79,6	77,5	2,6
3	73,6	71,1	3,4	76,7	73,1	4,7	77,6	72,7	6,3
4	71,8	70,6	1,7	74,8	71,8	4,0	74,4	70,5	5,2

Таблица 6

Сравнение прогнозируемых и опытных значений твердости для штамповки «Кронштейн» из сплава АМг6

№ точки	350 ° С		Откл., %	420 ° С		Откл., %
	Прогноз.	Опыт		Прогноз.	Опыт	
1	97,6	96,3	1,3	96,4	95,5	0,9
2	93,5	92,2	1,4	91,2	91,5	0,3
3	92,7	92,0	0,8	91,5	91,2	0,3
4	87,4	90,3	3,3	87,1	88,2	1,3

Сравнение экспериментальных данных и результатов прогнозирования показывает, что погрешность составляет не более 6-7%. Таким образом, разработанная АСП механических свойств алюминиевых изделий после горячей пластической деформации обладает высокой точностью решения,

что позволяет ее применять при проведении опытно-конструкторских, исследовательских работ на профильных предприятиях и в образовательных учреждениях. Применение АСП позволит проектировать технологический процесс обработки не только с точки зрения получения требуемой геометрии изделия, но и отталкиваясь от заданных конструктором прочностных свойств, сосредоточенных в какой-либо локальной области или равномерно распределенных по объему готового изделия.

На основании проведенных исследований разработана методика прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабрикатов в зависимости от степени деформации, температуры и скорости охлаждения. Методика включает в себя следующие этапы:

а) проведение механических испытаний клиновых образцов из исследуемого материала, полученных при прокатке при различных режимах для получения количественных значений изучаемых свойств;

б) математическое моделирование процесса пластического течения и охлаждения после деформирования клиновых образцов с целью определения распределения температур и интенсивности деформаций по объему изделия;

в) построение с помощью регрессионного анализа функциональных зависимостей механических свойств, полученных опытным путем, от параметров деформационного процесса, установленных в ходе математического моделирования;

г) создание базы данных, совмещающей данные по механическим свойствам и результаты конечно-элементного анализа;

д) использование полученных зависимостей при моделировании технологических процессов ОМД для установления распределения механических характеристик по объему изделия.

Данная методика разработана и апробирована для прогнозирования распределения следующих механических свойств алюминиевых сплавов АМг6 и Д1: предела текучести, предела прочности и твердости. Методика является универсальной и может применяться для прогнозирования

распределения механических, эксплуатационных и других свойств, зависящих от НДС, температуры и скорости охлаждения, различных металлов и сплавов.

### **Общие выводы по работе**

1. Получены количественные значения  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  и НВ при различных режимах деформирования и охлаждения. Варьируемыми параметрами являлись температура, степень деформации и скорость охлаждения после горячего деформирования. Температура нагрева перед деформацией составляла 380, 450 и 520 °С. Применение клиновых образцов дало возможность исследовать степень деформации от 0 до 75% в одном опыте, вследствие чего сократилось требуемое число экспериментов. Для моделирования различных режимов остывания после горячей обработки применялись изоляторы тепла различной мощности – стальные плиты, что позволило исследовать три режима охлаждения: на воздухе, между 2-мя слоями плит, между 4-х слоев плит - со скоростью охлаждения, равной 0,6; 0,35 и 0,1 °С/с соответственно.

2. Упрочнение образцов из сплавов АМг6 и Д1 происходит до степени деформации 55-60%, при дальнейшем ее увеличении механические характеристики снижаются вследствие активного развития процессов разупрочнения. Наилучшие прочностные характеристики в рассматриваемом диапазоне температур для сплава АМг6 достигнуты при деформировании при температуре 380°С и быстром охлаждении (на воздухе), что позволило получить частично нагартованные образцы. Максимальные механические свойства в этом случае составили:  $\sigma_{0,2}=212,2$  МПа,  $\sigma_b=373,5$  МПа, НВ=102,8 МПа. Охлаждение между 4-х слоев плит и повышение температуры деформирования до 520°С способствовали протеканию процесса разупрочнения и получению частично отожженных образцов, механические свойства снизились:  $\sigma_{0,2}=163,5$  МПа,  $\sigma_b=243,3$  МПа, НВ=85,9 МПа. Разница максимальных и минимальных значений механических свойств составила порядка 20%.

Для образцов из сплава Д1 наилучшие механические свойства достигнуты в результате обработки при температуре 520°C и быстром охлаждении, поскольку при данном режиме в сплаве Д1 происходит частичная закалка с последующим естественным старением. Максимальные механические свойства в этом случае составили:  $\sigma_{0,2}=225,7$  МПа,  $\sigma_B=343$  МПа, НВ=77,6 МПа. Низкая температура деформирования и медленное охлаждение позволили получить частично отожженные образцы со следующими значениями механических свойств:  $\sigma_{0,2}=133,5$  МПа,  $\sigma_B=215,4$  МПа, НВ=65,2 МПа. Разность максимальных и минимальных значений механических характеристик образцов составила 40%. Таким образом, упрочнение сплава Д1 складывается из двух составляющих: субструктурного упрочнения и упрочнения, вызванного эффектом закалки и старения.

3. Проведено компьютерное моделирование процесса прокатки и охлаждения клиновых образцов. Параметры процессов при моделировании полностью соответствовали выполненным ранее экспериментам. Исследован характер распределения компонентов напряженно-деформированного состояния и температуры, определены их количественные показатели. Выявлено, что НДС и температура имеют зонный характер распределения по продольному сечению клинового образца, что подтверждает правильность выбора схемы вырезки образцов для механических испытаний. Наличие градиента интенсивности напряжений и деформаций, а также характер распределения температур при охлаждении заготовки, свидетельствуют о том, что в процессе деформирования должны формироваться зоны с различными структурой и свойствами.

4. С помощью методов физического и математического моделирования установлены зависимости между показателями механических свойств алюминиевых сплавов АМг6 и Д1 и параметрами технологического процесса горячего деформирования при изменении интенсивности деформации в интервале 0,2-1,5 (относительная степень деформации

составила 0-75%), температуры нагрева перед деформацией от 380 °С до 520°С и скорости охлаждения после формоизменения от 0,1 °С/с до 0,6 °С/с.

5. На основании проведенных опытов сформирована база данных, совмещающая результаты конечно-элементного анализа и экспериментальные значения механических свойств с помощью линейной аппроксимации.

6. Осуществлена опытная проверка полученных регрессионных моделей. Для этой цели изготовлены штамповки мембраны из сплава Д1 и кронштейна из сплава АМгб и проведены замеры твердости с целью определения распределения механических свойств по сечению штамповки. Несмотря на различие схем НДС при прокатке и штамповке, отклонение расчетных данных от экспериментальных не превысило 5%. Это позволяет говорить о том, что интенсивность деформации является универсальным параметром, который позволяет при одинаковых температурно-скоростных условиях деформирования и последующего охлаждения правильно соизмерять влияние НДС на свойства полуфабрикатов, получаемых различными процессами горячей ОМД.

7. Разработана методика прогнозирования распределения механических свойств по объему полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, изготавливаемых методами горячей обработки давлением, основанная на совмещении методов физического и математического моделирования и учете объединенного влияния температуры, деформации и скорости охлаждения на величину механических свойств материала. Методика включает в себя следующие этапы:

а) проведение механических испытаний клиновых образцов из исследуемого материала;

б) компьютерное моделирование процесса пластического течения и охлаждения после деформирования клиновых образцов;

в) построение функциональных зависимостей механических свойств от параметров деформационного процесса;

г) создание базы данных;

д) использование полученных зависимостей при моделировании технологических процессов ОМД.

8. На основе разработанной базы данных создано программное приложение к современным САЕ-системам – автоматизированная система прогнозирования распределения механических свойств (АСП). АСП позволяет проектировать технологические процессы горячей ОМД алюминиевых сплавов со следующими прогнозируемыми параметрами: предел прочности, предел текучести и твердость в каждой зоне сечения получаемого изделия. Экспериментальная проверка разработанной системы проводилась при штамповке мембраны из сплава Д1 и кронштейна из сплава АМг6 с последующим замером твердости по Бринеллю. Сравнение экспериментальных и спрогнозированных значений твердости штамповок из сплавов Д1 и АМг6 показало хорошую корреляцию, погрешность не превышает 6,5%, что позволяет говорить о высокой точности решения. Привлечение математического моделирования для прогнозирования свойств материалов создает условия для перехода от качественных к количественным показателям при оценке влияния технологических параметров процесса на свойства конечных изделий, получаемых методами горячей ОМД, на стадии конструкторско-технологической подготовки производства.

9. Методика прогнозирования, разработанная и апробированная для сплавов Д1 и АМг6, является универсальной и может применяться для прогнозирования механических, эксплуатационных, функциональных и других свойств, зависящих от параметров технологического процесса изготовления изделий из различных металлов и сплавов.

10. Материалы работы внедрены в учебный процесс МАИ (НИУ) при подготовке бакалавров по дисциплине «Моделирование процессов и систем».

#### **Публикации по теме диссертации**

1. Галкин В.И., Дорофеева М.Г., Палтиевич А.Р., Преображенский Е.В. Исследование возможности прогнозирования методами конечно-

элементного анализа структуры и свойств алюминиевых изделий, полученных процессами горячей пластической деформации. //«Технология легких сплавов». Москва, издательство ОАО «ВИЛС», №3, 2013г, с.12-20.

2. Галкин В.И., Головкина М.Г., Палтиевич А.Р., Преображенский Е.В. Прогнозирование структурного состояния и механических свойств изделий из алюминиевых сплавов с использованием компьютерного моделирования. //«Авиационная промышленность», Москва, №1, 2015г, с.48-55.

3. Галкин В.И., Головкина М.Г. Исследование влияния условий объемной штамповки на формирование механических свойств изделий из алюминиевых сплавов // «Технология легких сплавов». Москва, издательство ОАО «ВИЛС», №1, 2016г, с.138-143.

4. Дорофеева М.Г. Разработка методики и математической модели прогнозирования металлографической структуры и механических характеристик изделий из алюминиевых сплавов после горячего пластического деформирования. XXXIX Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. М.: МАТИ, 2013 т.1, с.195-197.

5. Галкин В.И., Дорофеева М.Г., Палтиевич А.Р., Преображенский Е.В. Разработка САЕ-приложения для прогнозирования металлографической структуры и механических свойств изделий из алюминиевых сплавов, полученных горячим пластическим формоизменением. Одиннадцатая Всероссийская научно-практическая конференция «Применение ИПИ-технологий в производстве». Труды конференции, М:МАТИ, 2013г, с.7-15.

6. Дорофеева М.Г. Разработка САЕ-приложения для прогнозирования структуры и механических свойств изделий, получаемых методами обработки металлов давлением. XXXX Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. М.: МАТИ, 2014г, с.46-47.

7. Галкин В.И., Головкина М.Г., Палтиевич А.Р., Преображенский Е.В. Создание программного приложения для САЕ-систем на базе разработанной методики прогнозирования структуры и механических свойств изделий, получаемых методами обработки металлов давлением. Тринадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством». Сборник материалов, Москва, 2014г, с.76-77.

8. Галкин В.И., Головкина М.Г., Палтиевич А.Р. Оценка влияния температурно-скоростных параметров процесса деформирования на формирование механических свойств и структуры изделий из алюминиевых сплавов. Научные труды /Вестник МАТИ/ Выпуск 24 (96), 2014г, с.17-22.

9. Галкин В.И., Головкина М.Г., Палтиевич А.Р., Преображенский Е.В. Управление структурой и свойствами изделий, получаемых методами обработки металлов давлением. Четырнадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством». Сборник материалов, Москва, 2015г, с.140-144.

10. Головкина М.Г. Прогнозирование механических свойств изделий из алюминиевых сплавов после горячей деформации. XLII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. Сборник тезисов докладов в 4 т. М.: МАИ (НИУ), т.3, 2016г, с.508-509.

11. Галкин В.И., Головкина М.Г. Прогнозирование распределения механических свойств по объему изделий, получаемых методами горячей деформации, с использованием САЕ-систем. Сборник материалов научно-технической конференции «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов». Научное электронное издание. М.: ФГУП ВИАМ, 2016г.

12. Галкин В.И., Головкина М.Г. Прогнозирование распределения механических свойств по объему изделий, получаемых методами горячей деформации, с использованием САЕ-систем. // «Новости материаловедения. Наука и техника». Электронный научный журнал, №3, 2016г, с.73-79.