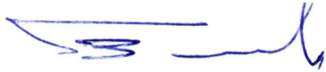


На правах рукописи



Галкин Владимир Викторович

Научно-технологическая концепция формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения на основе поэтапного структурно-деформационного анализа

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
2.6.4 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **Пачурин Герман Васильевич**

Официальные оппоненты:

Матюнин Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры «Технологии металлов» (г. Москва)

Сарафанов Георгий Федорович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН), заведующий лабораторией наноструктурных материалов и упрочняющих технологий (г. Н. Новгород).

Лавриненко Владислав Юрьевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов» (г. Москва).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук» (ИМЕТ РАН), (г. Москва).

Защита диссертации состоится « 27 » октября 2023 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.345.03 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу:
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корпус 1, ауд. 1313.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» <https://www.nntu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>.

Автореферат разослан « »

2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Т.В. Нуждина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Получение заготовок и деталей из металлических сплавов с требуемыми механическими свойствами является приоритетным направлением развития машиностроения. Пластическое деформирование является одним из основных процессов изготовления изделий, при котором формоизменение металлических сплавов сочетается с формированием механических свойств, определяемых изменением структурного состояния. Для большинства процессов пластическое деформирование происходит в условиях сложного нагружения.

Большой вклад в развитие теоретических положений формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в зависимости от структурного состояния внесли известные зарубежные и отечественные ученые. Впервые вопросы зависимости механических свойств от дефектности кристаллов, были обозначены в 20-х годах XX века А. Гриффитсом и экспериментально подтверждены А.Ф. Иоффе, С.Н. Журковым и А.П. Александровым. Для описания механизма скольжения при пластической деформации монокристаллов в 1934 г. Е. Орованом, М. Полони и Д. Тейлором введено представление о дислокациях, как линейных искажений кристаллической решетки металлического сплавов. В дальнейшем фундаментальные труды А.Х. Котрелла, В.Т. Рида, Ж. Фриделя, И.А. Одингга, И.И. Новикова и других ученых сформировали основные положения теории о дефектах кристаллического строения металлических сплавов применительно к пластическому деформированию и формированию механических свойств. Своеобразие структурообразования металлических сплавов на стадии развитой пластической деформации было изложено в работах В.И. Трефилова с сотрудниками, а далее получило развитие в трудах В.В. Рыбина, В.В. Панина. В исследованиях процессов рекристаллизации и их влиянии на формирование структуры и свойств металлических сплавов следует отметить фундаментальные работы С.С. Горелика, Л.М. Капуткиной, С.В. Добаткина, В.Ю. Новикова, А.Н. Орлова, В.Н. Перевезенцева, В.Н. Чувильдеева. Зависимости механических свойств металлических сплавов от накопления повреждений при пластической обработке приведены в трудах В.И. Бетехтина, В.И. Владимировой, Л.М. Качанова, Р. Хоникомба, Л.Д. Соколова, В.А. Скуднова и других ученых.

Первые исследования процессов пластического деформирования в условиях сложного нагружения, и связанной с ними пространственной неоднородности деформированного и структурного состояния материала, относятся к работам Ф. Кика, Э. Холленберга, Н. Метца, К.У. Мак-Грегора, П. Коффина и других ученых начала XX века. Среди отечественных ученых, внесших значительный вклад в изучение данного явления, необходимо назвать Д.К. Чернова, С.И. Губкина, И.М. Павлова, М.В. Сторожева, А.А. Илюшина, Н.И. Корнеева, Г.А. Смирнова-Аляева, И.Я. Тарновского, Г.А. Навроцкого, Е.М. Макушка, В.А. Колмогорова, Я.М. Охрименко. В работах ученых дана оценка неравномерности деформации в процессах пластической деформации, изложены математические правила расчета показателей напряженно-деформированного состояния, введено понятие механической схемы деформации.

Проведенный аналитический обзор показал, что к настоящему времени, не смотря на большое количество научных работ, отсутствуют данные о структурных изменениях металлических сплавов в условиях сложного нагружения и их влияния на формирование механических свойств. Преобладающее число исследований выполнялось в условиях одноэтапных стандартизованных испытаний с использованием сжатия, растяжения, кручения. Полученные результаты невозможно использовать для оценки действующих процессов пластической деформации.

Как следствие, до сих пор нерешенными и актуальными являются задачи:

- установление закономерностей изменения структуры и дефектности металлических сплавов в условиях многопереходной холодной обработки и их влияния на деформационное упрочнение;
- определение формирования структуры на стадиях процесса рекристаллизации в условиях горячей дробной деформации и ее влияния на ударную вязкость;

- установление закономерностей накопления повреждений в тонколистовых материалах в условиях теплого и горячего деформирования и жестких схем напряженного состояния и их влияния на предельную пластичность;
- выявление структурно-механической характеристики горячедеформированного металлического сплава, контролирующей сопротивления усталости;
- установление закономерностей изменения структуры и пластичности трудно деформируемых металлических сплавов в зависимости от неравномерности всестороннего сжатия при горячей объемной обработке.

Наличие нерешенных практических задач формирования механических свойств деформированных металлических сплавов подтверждает актуальность исследований структурных изменений металлических сплавов в условиях сложного нагружения и определения путей их выполнения.

Степень разработанности темы. Содержание работы соответствует: направлению развития науки и техники Нижегородской области по программе «Новые технологии машиностроения, транспортные и космические системы»; приоритетному направлению развития науки, технологии и техники в РФ «Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники»; Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года; Государственной программе Российской Федерации «Развитие науки и технологий»; Государственной программе Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»; Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы». Работа способствует развитию технологической платформы «Материалы и технологии металлургии».

В ходе анализа степени разработанности темы исследования, определены причины немногочисленности структурных исследований и отсутствия данных о закономерностях изменения структурного состояния материалов в условиях сложного нагружения, которые определяют формирование механических свойств. Выявлена несостоятельность методологии исследований деформированных металлических сплавов с использованием одноэтапных стандартизованных испытаний в условиях монотонного нагружения, что определило необходимость разработки новой концепции проведения исследований, обеспечивающей установление закономерностей изменения структурно-механических свойств в условиях сложного нагружения. Структура разработанной концепции включила:

- деформирование металлических сплавов в условиях сложного, в том числе многопереходного нагружения, с применением технологических испытаний;
- применение методологии исследований деформированных металлических сплавов, основанной на методе поэтапной оценки изменения структурного состояния и формировании механических свойств с учетом накопленной степени деформации;
- разработку методического обеспечения для построения зависимостей структурно-механических свойств от степени деформации в условиях сложного нагружения;
- разработку программного обеспечения для поэтапного обсчета структурно-механических характеристик деформированных металлических сплавов.

На основании выше изложенного сформулирована **цель работы**: разработка научно-технологической концепции определения в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения закономерностей изменения структурно-механических свойств деформированных металлических сплавов для получения изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Для достижения цели определены **задачи**:

1. Определить алгоритм проведения технологических и структурных исследований в условиях сложного нагружения, в которых изменение структуры и механических свойств металлических сплавов на этапах деформирования оценивается с учетом накопленной степени деформации.

2. Разработать программное обеспечение для количественного обсчета параметров микроструктуры и анализа структурно-механических характеристик деформированных металлических сплавов.
3. Разработать методику построения обобщенных кривых деформационного упрочнения для оценки упрочнения металлических сплавов в условиях сложного холодного нагружения.
4. Сформировать способ построения зависимостей рекристаллизации деформированных металлических сплавов для условий горячего сложного нагружения.
5. Установить способ прогнозирования циклической долговечности горячедеформированных металлических сплавов, на основе выявления определяющей структурно-механической характеристики.
6. Разработать конструкцию устройства для высокотемпературного двухосного растяжения тонколистовых материалов методом выпучивания мембран.
7. Выявить закономерности поэтапного изменения структуры и дефектности деформированных металлических сплавов в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения и их влияния на формирование механических свойств.
8. Разработать и внедрить в производство технологии, обеспечивающие изготовление изделий из металлических сплавов с требуемыми механическими свойствами.

Объектом исследования в работе являются деформированные металлические сплавы в условиях сложного нагружения: стали ферритно-перлитного класса 10, 20, 20Г2Р, 30Г1Р; стали аустенитного класса X18H10T, 12X17Г9АН4; сталь пружинно-рессорного класса 50ХГФА; тонколистовые титановые сплавы ОТ4-1, ВТ6С; чугун с шаровидным графитом.

Предметом исследования в работе являются структурно-механические характеристики деформированных металлических сплавов в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые разработана научно-технологическая концепция формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения, основанная на поэтапном анализе структурных изменений с учетом накопленной степени деформации, и обеспечивающая получение изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами.
2. Выявлены закономерности поэтапного изменения структурного состояния и их влияния на формирование требуемых механических свойств деформированных металлических сплавов различных классов в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения:
 - изменения структурного состояния сталей ферритно-перлитного класса на переходах холодного объемного деформирования характеризуются немонотонным изменением трехмерной дефектности, о чем свидетельствует изменение плотности материала при поэтапном повышении прочности; упрочнение и пластичность деформируемого материала определяются по обобщенным кривым деформационного упрочнения в зависимости от накопленной степени деформации;
 - стадии протекания рекристаллизации сталей аустенитного класса при горячем дробном деформировании зависят от степени деформации на переходах, накопленной степени деформации, времени выдержки при фиксированной температуре и величины зерна на переходах обработки; максимальный рост зерна на стадиях динамической и собирательной рекристаллизации происходит при обработке недеформированного материала в интервале критических степеней деформации;
 - изменения структуры и дефектности тонколистовых титановых сплавов, деформированных в интервалах температур $(20 \div 900) \text{ } ^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3}) \text{ c}^{-1}$, неодинаково зависят от жесткости напряженного состояния; жесткость напряженного состояния не влияет на последовательность изменения характера микроструктуры, что подтверждается одинаковой сменой механизмов разрушения на температурно-скоростных зависимостях предельной деформации; повышение жесткости напряженного состояния интенсифицирует развитие

дефектности, чему соответствует смещение точек рекристаллизационного перегиба кривых предельной деформации в сторону увеличения температуры и уменьшения их величины;

– оценка влияния структурных параметров и механических характеристик прокатанной полосовой рессорной стали при 1200 °С в диапазоне обжатий до 40% на показатель циклической долговечности показала, что для горячедеформированного металлического сплава величина рекристаллизованного зерна является определяющей характеристикой сопротивления усталости; наименьшее сопротивление усталости соответствует интервалу критических степеней деформации;

– уменьшение температуры горячей деформации (полугорячая деформация) снижает влияние структурного параметра и увеличивает значение показателя деформационного упрочнения на сопротивление усталости, что было подтверждено при исследованиях листовой аустенитной стали в условиях многопереходной формовки гофрированных панелей;

– создание условий всестороннего неравномерного сжатия при деформировании материала повышает его пластичность, что было подтверждено изготовлением объемного изделия из чугуна с шаровидным графитом горячим деформированием в открытом штампе.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Сформулирован алгоритм проведения технологических и структурных исследований в условиях сложного нагружения, основанный на применении поэтапного метода исследований с учетом накопленной степени деформации, разработанного программного и методического обеспечения.

2. Разработано программное обеспечение для количественного обсчета параметров микроструктуры и анализа структурно-механических характеристик металлических сплавов при многоэтапном пластическом деформировании:

– программа для ЭВМ для анализа структурно-механических характеристик металлических сплавов при многоэтапном пластическом деформировании (Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614913 от 31.03.21 г.);

– программа для ЭВМ по определению величины зерна для количественной оценки холоднодеформированного состояния сталей и сплавов (Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2914613502 от 27.03.14 г.);

– программа для ЭВМ по определению величины зерна для оценки рекристаллизации горячедеформированных сталей и сплавов (Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611190 от 26.01.15 г.).

3. Разработана методика построения обобщенных кривых деформационного упрочнения для оценки упрочнения в условиях многоэтапного холодного нагружения.

4. Сформирован способ оценки процесса рекристаллизации металлических сплавов в условиях горячего сложного нагружения посредством построения зависимостей средней величины зерна от интенсивности деформации и температуры.

5. Впервые разработана конструкция устройства для испытания тонколистового металлического материала на двухосное растяжение методом выпучивания в интервале температур $(20 \div 900)$ °С и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3})$ с⁻¹. (Авторские свидетельства № 1194141, МКИ³ G 01N3/10 от 22.07.1985г.; № 1299264, МКИ³ G 01N 3/08 от 22.11.1986 г.; Евразийский патент № 040659, заявка № 202100064 от 29.12.2020 г, патент выдан 12.07.22 т.) Конструкция устройства аттестована Научным советом ВДНХ СССР в 1987 г. и награждена серебряной медалью ВДНХ.

6. Установлен способ прогнозирования циклической долговечности горячедеформированных металлических материалов. (Патент № 2 619 480 С1, МПК G 01 N 3/32 от 16.05.2017 т.).

7. Разработана технология газо-компрессионной формовки в нагретых керамических штампах листовых гофрированных панелей из титановых сплавов. Режимы деформирования основаны на использовании температурно-скоростных зависимостей предельной деформации, выявленных в ходе диссертационных исследований. (Авторское свидетельство № 1814234, МКИ³ В 21 D 26/02 от 11.10.1992 г.).

8. Разработана конструкция штампа с электро-контактным нагревом заготовки для вытяжки деталей типа "баллон" из малопластичных металлических материалов, в частности титановых сплавов. (Авторское свидетельство № 1517213, МКИ³ G 01 N 3/10 от 22.06.1989 г.).

9. Разработан метод прогнозирования механических свойств деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения на основании разработанной методологии структурно-механических исследований. Расширена информационная база проектирования процессов высадки крепежных изделий из сталей ферритно-перлитного класса. Проведена оптимизация технологии изготовления кованных поковок из сталей аустенитного класса.

Методология и методы исследования

Исследования металлических сплавов проводилось с использованием технологических испытаний, условия нагружения которых соответствуют основным процессам пластического деформирования: свободной ковке, объемной холодной и горячей штамповке, листовой формовке и вытяжке, продольной прокатке.

Оценка изменения структуры и дефектности металлических сплавов, и связанных с ними формирование механических свойств, проводились с использованием поэтапного метода исследований, с учетом накопленной степени деформации и разработанного программного и методического обеспечения.

Моделирование технологических испытаний для определения положения исследуемых зон металлических сплавов на этапах деформирования и накопленной степени деформации проводилось с использованием программного комплекса DEFORM-3D.

Механические испытания включили стандартные испытания на одноосное растяжение (ГОСТ 1497), измерение твердости по Роквеллу (ГОСТ 9013), Виккерсу и микротвердости (ГОСТ 9450).

Исследования структуры включили: макро- и микроструктурный анализ с использованием оптической микроскопии на микроскопах AXIO Imager.Alm ($\times 200$), KeyenceVHX-1000, МБС-10 ($\times 32$), МИМ-7; фрактографический анализ изломов на растровых электронных микроскопах РЭМ 2000 и SAMSUNGSEM 515; рентгеноструктурный анализ на установке ДРОН-2 с измерением релаксации напряжений на автоматизированной установке; измерение плотности материала на аналитических весах ДВ-200 методом гидростатического взвешивания.

Испытания на усталость проводились на плоских образцах (ГОСТ 25.502) при комнатной температуре методом консольного изгиба с симметричным циклом нагружения с частотой 1500 цикл/мин на механической испытательной установке и электромагнитной установке ЭМУ-5.

Положения, выносимые на защиту:

1. Научно-технологическая концепция формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения, основанная на установлении закономерностей поэтапного изменения их структурного состояния, и обеспечивающая получение изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами.

2. Выявленные закономерности изменения структурного состояния и механических свойств деформированных металлических сплавов различных классов в различных температурно-скоростных условиях сложного нагружения:

- ферритно-перлитные стали при холодном многопереходном объемном деформировании;
- стали аустенитного класса при горячей объемной дробной деформации;
- тонколистовые титановые сплавы в условиях высокотемпературного двухосного растяжения методом выпучивания мембран;
- рессорная сталь в условиях горячей продольной прокатки полосового материала на клин;
- тонколистовые стали аустенитного класса при горячей и холодной многопереходной листовой формовке;
- чугун с шаровидным графитом в условиях горячего объемного деформирования в открытых штампах.

3. Алгоритм проведения технологических и структурных исследований в условиях сложного нагружения, основанный на применении поэтапного метода с учетом накопленной степени деформации, и разработанного программного и методического обеспечения, которое включило:

- программное обеспечение для количественного обседа параметров микроструктуры и анализа структурно-механических характеристик металлических сплавов при многоэтапном пластическом деформировании;
- методику построения обобщенных кривых деформационного упрочнения для оценки упрочнения в условиях сложного холодного нагружения;
- способ оценки процесса рекристаллизации металлических сплавов в условиях горячей дробной деформации посредством построения зависимостей среднего диаметра зерна от интенсивности деформации и температуры;
- способ прогнозирования циклической долговечности горячедеформированных металлических сплавов, на основе выявления определяющей структурной характеристики;
- конструкцию устройства высокотемпературных испытаний тонколистовых материалов на двухосное растяжение методом выпучивания мембран в интервале температур $(20\div 900)^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $(10^{-1}\div 10^{-3})\text{c}^{-1}$.

4. Производственные технологии автомобильной и авиационной промышленности, основанные на установленных закономерностях структурных изменений деформированных металлических сплавов.

Личный вклад автора состоит в формировании цели и постановке задач исследований, формулировке общих выводов и заключения, проведении теоретических исследований, экспериментальных работ и обработке полученных результатов, проводимых на протяжении 35 лет, начиная с 1986 г. Участие соавторов работ отражено в совместных публикациях. Автор диссертации выражает благодарность научному консультанту д.т.н., профессору Пачурину Г.В., а также на начальных этапах подготовки диссертации д.т.н. профессору Скуднову В.А., д.т.н., профессору Кошелеву О.С.

Степень достоверности и апробация результатов, научных положений, выводов, рекомендаций подтверждается использованием современных методов исследования, значительным объемом экспериментальных данных, промышленным опробованием, натурными испытаниями, апробацией полученных результатов на научно-технических конференциях и семинарах разного уровня, а также согласованностью полученных результатов с известными экспериментальными данными. В работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на 15 международных и общесоюзных и российских конференциях, конгрессах и симпозиумах: 4-я Всесоюзная науч.-техн. конф. «Сверхпластичность металлов» (г. Уфа, УПИ, 1987 г.), 5-я Всесоюзная науч.-техн. конф. «Текстуры и рекристаллизация в металлах и сплавах» (г. Уфа, 1989 г.); Всероссийская науч.-технич. конф. по САПР (Москва, МАИ, 2005 г.); III-я науч. конф. «Инженерные системы – 2005» (Москва, МФТИ, 2005 г.); 8-я, 13-я Международная науч.-практич. конф. «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано до микроуровня» (СПб, 2006, 2011 г.г.); Международная науч.-практич. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований» (г. Одесса, 2012 г.); 13-я Международная. промышленная конф «Материалы. Методы. Технологии» (п. Плавья, Карпаты, 2013 г.); Международная науч.-практич. конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте» (г. Одесса, 2013 г.); 10 Международная науч.-практич. конф. «Стратегические вопросы мировой науки» (2014 г.); VI Международная конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва. ИМЕТРАН, 2015г.); VI Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (г. Суздаль. ИМЕТРАН, 2016 г.); IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 042024 doi:10.1088/1757-899X/971/042024; Международная науч.-практич. конф. «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (г.

Севастополь. ISMTMTE, 2021 г.); VI Международная науч.-производ. конф. «Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России» (г. Ульяновск, 2021 г.); на заседании кафедры «Материаловедение и основы конструирования» ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров; на заседании кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск; на заседании Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов ФГБУН «Институт металлургии и металловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук», г. Москва.

Публикации. Результаты работы по диссертационному исследованию отражены в основных 68 публикациях, включая статьи в рецензируемых журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций, в том числе 28 из перечня изданий ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 9 индексируемых в МВД Web of Science и Scopus. По результатам работы в соавторстве получено 9 патентов, издано 3 монографии.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация изложена на 336 страницах машинописного текста и включает: введение, шесть глав, заключение, список литературы, семь приложений. Работа содержит 265 рисунков, 36 таблиц. Список литературы включает 269 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту,

Первая глава (Современные представления о структурных изменениях металлических сплавов при пластическом деформировании и их влиянии на формирование механических свойств) содержит теоретические и экспериментальные сведения о структурных изменениях металлических сплавов в процессах пластического деформирования и их влиянии на механические свойства. Приведены сведения о параметрах структурно-энергетического, металлургического и технологического состояния материала и их влиянии на механические свойства. Изложены теоретические положения о структурных изменениях металлических сплавов в условиях холодной и горячей деформации, приведены закономерности накопления повреждений и математические модели их описания. Рассмотрено влияние сложного нагружения на механические свойства деформируемого материала.

При анализе степени разработанности темы работы была выявлена несостоятельность методологии исследований деформированных материалов с использованием стандартизованных испытаний, применяемых для условий монотонного нагружения, что определило необходимость для условий сложного нагружения разработки научно-технологической концепции формирования механических свойств деформированных сплавов.

Во второй главе (Научно-технологическая концепция структурно-механических исследований деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения) изложены положения разработанной концепции, основанной на поэтапном анализе изменения структуры и дефектности деформированных металлических сплавов с учетом накопленной степени деформации (рисунок 1).



Рисунок 1 – Научно-технологическая концепция поэтапного формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения

Структура разработанной концепции включила:

- исследование деформированных металлических сплавов в технологических испытаниях со сложным, в том числе многопереходным нагружением;
- применение методологии, основанной на методе поэтапной оценки изменения структурного состояния и формирования механических свойств с учетом накопленной степени деформации;
- разработку программного обеспечения для обьсчета структурно-механических характеристик деформированных металлических сплавов;
- разработку методического обеспечения для построения зависимостей формирования механических свойств от структурных изменений.

В соответствии со структурой концепции разработана программа работы, в которую вошло: разработка программного и методического обеспечения; поэтапное определение структурно-механических характеристик деформированных сплавов в технологических испытаниях; определение закономерностей структурных изменения и их влияния на формирование механических свойств с учетом накопления степени деформации; разработка рекомендаций по оптимизации режимов пластической деформации.

Программное и методическое обеспечение включило разработку: программ для ЭВМ для обьсчета структурных параметров металлических сплавов; методику построения обобщенных кривых деформационного упрочнения; способ построения зависимостей рекристаллизации материалов для условий сложного нагружения; конструкцию устройства высокотемпературного двухосного растяжения тонколистового материала.

С целью подтверждения универсальности концепции для различных видов и условий сложного нагружения были выбраны технологические испытания: холодное и горячее многопереходное объемное деформирование; высокотемпературное двухосное растяжение методом выпучивания мембран; горячая продольная прокатка; горячая и холодная многопереходная листовая формовка; горячее объемное деформирование в открытых штампах.

В работе исследовались металлические сплавы различных классов: стали 10, 20, 20Г2Р, 30Г1Р, Х18Н10Т, 50ХГФА, 12Х17Г9АН4, 16ХСН, 14Х17Н2; листовые титановые сплавы ОТ4-1 и ВТ6С; чугун с шаровидным графитом.

Третья глава посвящена разработанному программному и методическому обеспечению структурно-механических исследований для условий сложного нагружения.

Развитие программного обеспечения включило разработку трех программ для ЭВМ. Первые две программы, основанные на использовании программного обеспечения NI Vision в среде Lab VIEW, выполняют измерения величины зерна с использованием бинаризации цифровых фотографий микроструктуры, производят расчеты и графические построения.

Третья программа разработана для оценки величины зерна и разнотерности с использованием языка программирования C++. Блок-схема программы приведена на рисунке 2.

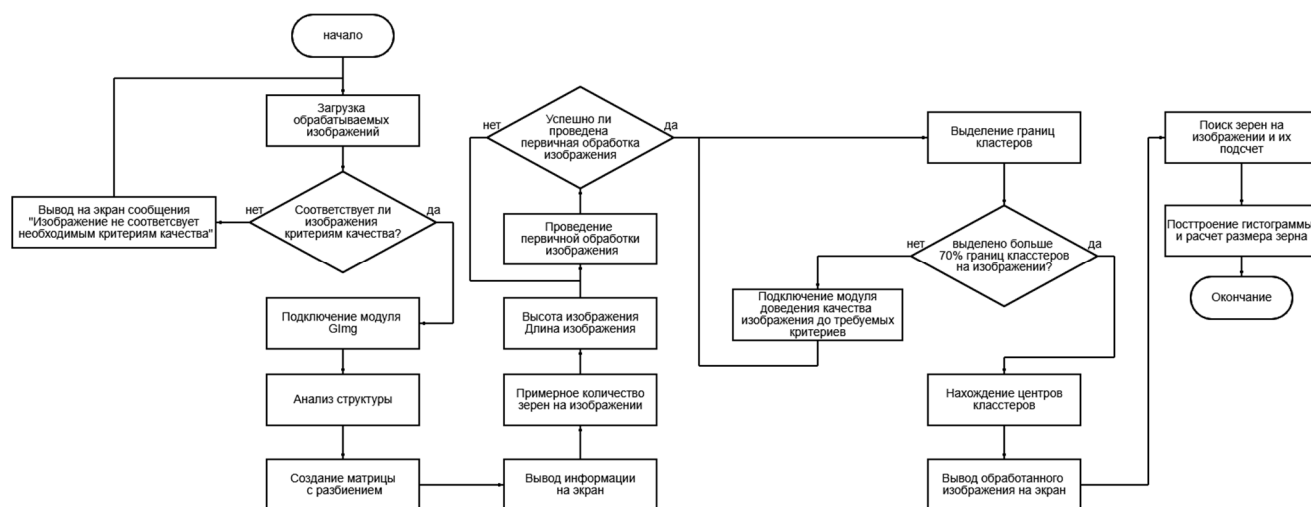


Рисунок 2 – Блок-схема программы для ЭВМ с использованием языка программирования C++

Программа обеспечивает количественный обсчет микроструктуры при увеличении в интервале от 100 до 1000 крат и может использоваться на цифровых микроскопах любого вида.

Разработанная методика изложена на примере построения обобщенной кривой упрочнения стали 20 (рисунок 3). Используется совмещение зависимостей:

- интенсивность напряжений – твердость (рисунок 4) определяется выражениями с использованием прочностных свойств металла, определяемых при линейном растяжении;
- степень деформации – твердость (рисунок 5) строится по результатам исследования металлического сплава на переходах деформирования. Замеры твердости проводятся в зонах, степень деформации которых определяется методом математического моделирования.

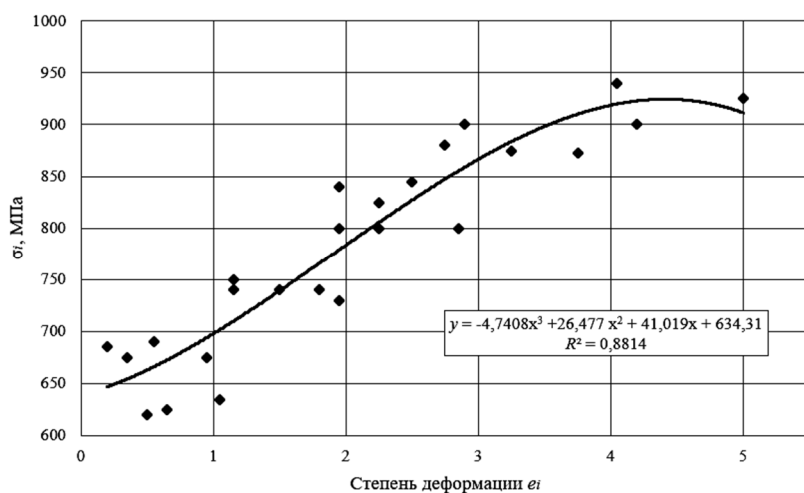


Рисунок 3 –
Обобщенная кривая
деформационного
упрочнения стали 20

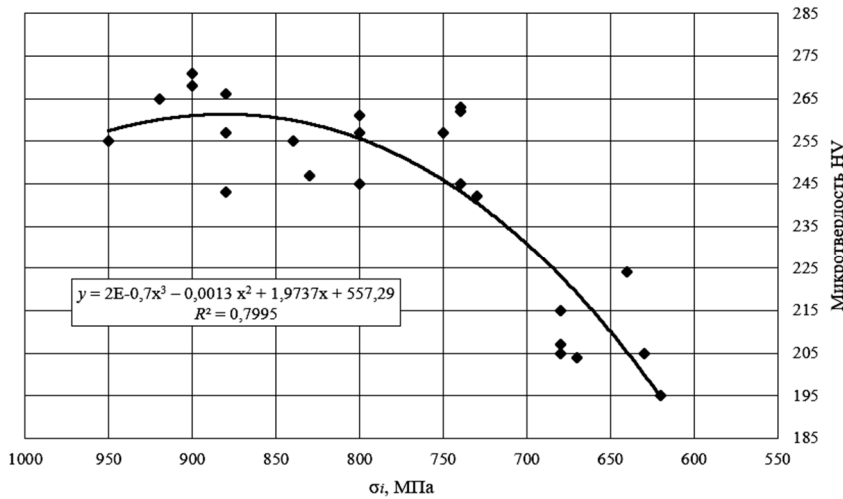


Рисунок 4 – Зависимость интенсивность напряжений – твердость стали 20

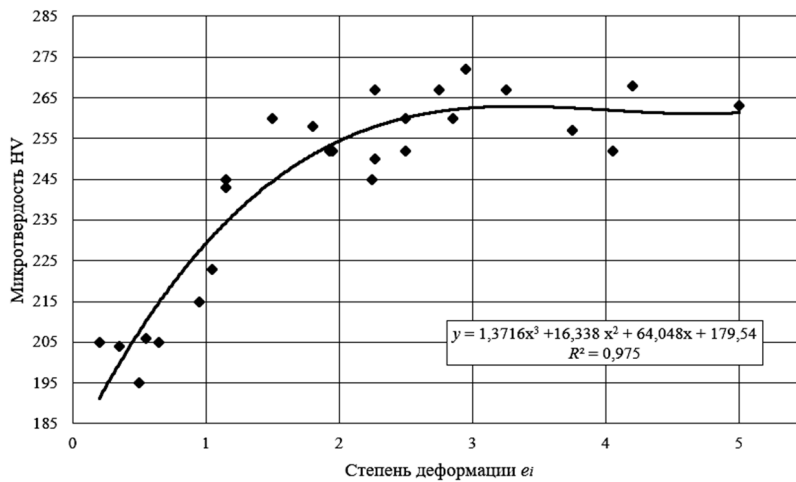


Рисунок 5 – Зависимость степень деформации – твердость стали 20

Способ построения зависимостей рекристаллизации металлических сплавов для условий сложного нагружения основан на использовании неравномерности деформации материала при осадке, которая позволяет на продольных сечениях двух осаженных образцов со степенями обжатия 10% и 50% методом математического моделирования обозначить поля интенсивности деформаций в интервале от 0 до 0,8 (рисунок 6 а).

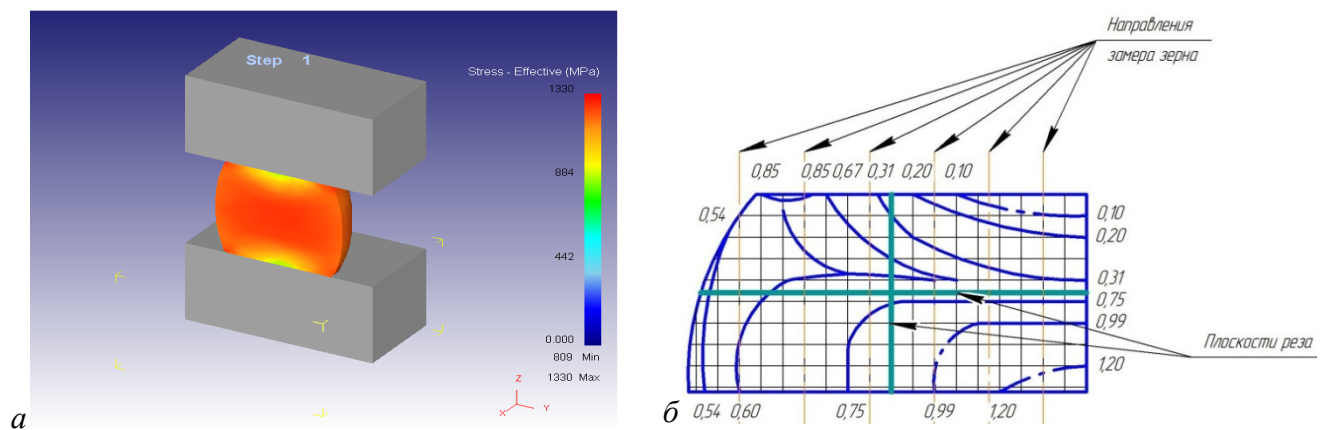


Рисунок 6 – Осадка образца со степенью обжатия $\epsilon_h = 50\%$: а – картина деформированного состояния; б – поля интенсивности деформации ϵ_i в продольном сечении осаженного образца

Построения зависимостей рекристаллизации осуществляется количественной оценкой интенсивности деформации в центрах ячеек с координатной сеткой размером 2,0 мм × 2,0 мм (рисунок 6 б), в которых металлографическим методом определяется величина зерна.

На рисунке 7 приведена построенная зависимость средней площади зерна стали 14X17H2 от интенсивности деформации при температуре 1100 °С.

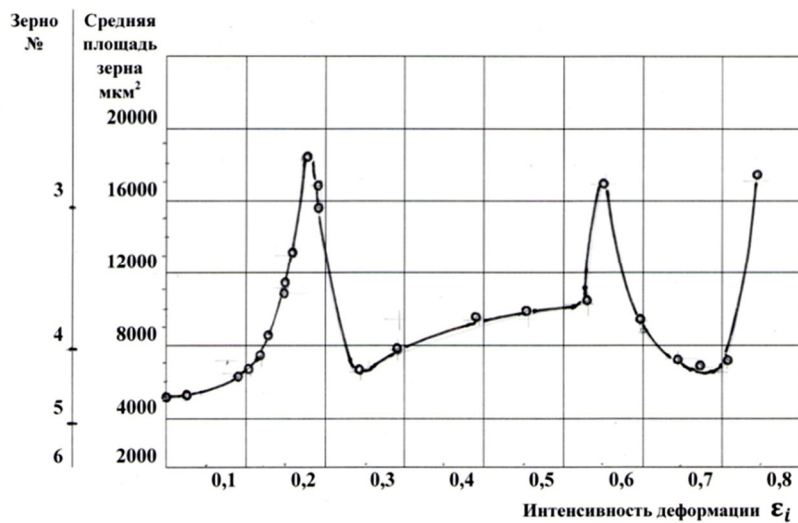


Рисунок 7 – Зависимость средней площади зерна стали 14X17H2 от интенсивности деформации при температуре 1100 °С

В главе 4 приведены результаты структурно-механических исследований деформированных металлических сплавов в технологических испытаниях.

Для объемного холодного нагружения исследования стали 10 проводились на переходах деформирования шестигранной гайки (рисунок 8), стали 20Г2Р – на переходах деформирования фланцевого болта.

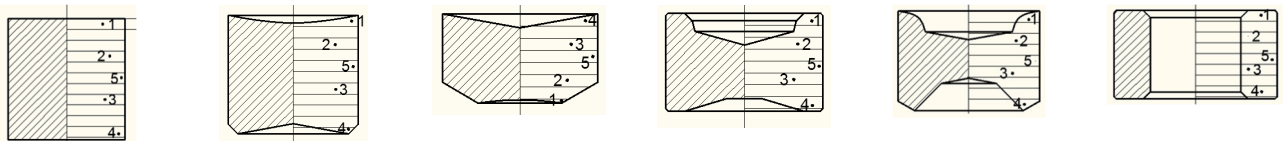


Рисунок 8 – Переходы деформирования шестигранной гайки из стали 10 (цифры – номера зон)

Результаты исследований включили замеры величины зерна, микротвердости и плотности материала в исследуемых зонах переходов деформирования. К примеру, для 3-й зоны микроструктура 4-го перехода деформирования стали 10 приведена на рисунке 9.

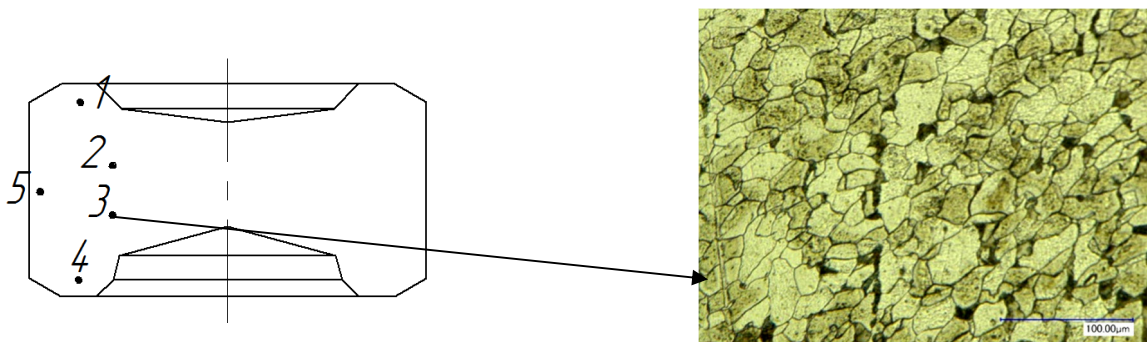


Рисунок 9 – Микроструктура стали 10 в 3-й зоне 4-го перехода деформирования

Технологические испытания в условиях горячей дробной обработки стали 12X18H10T включили изготовление ступенчатой заготовки (рисунок 10).

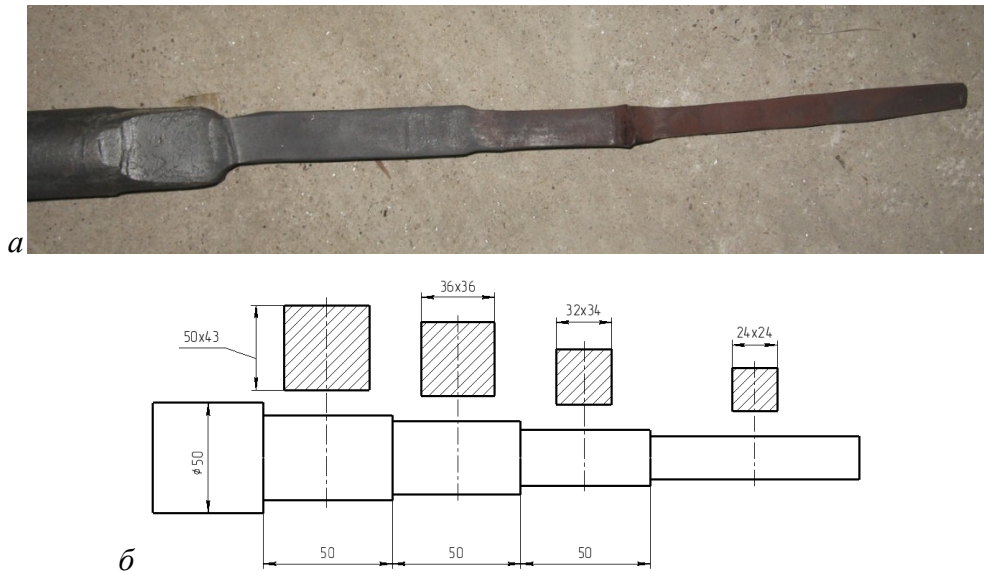


Рисунок 10 – Ступенчатая заготовка: *a* - фотография; *б* - эскиз

По результатам исследований определена величина зерна в исследуемых зонах поперечных сечений ступеней заготовки (рисунок 11 *a*) и при деформировании (рисунок 11 *б*).

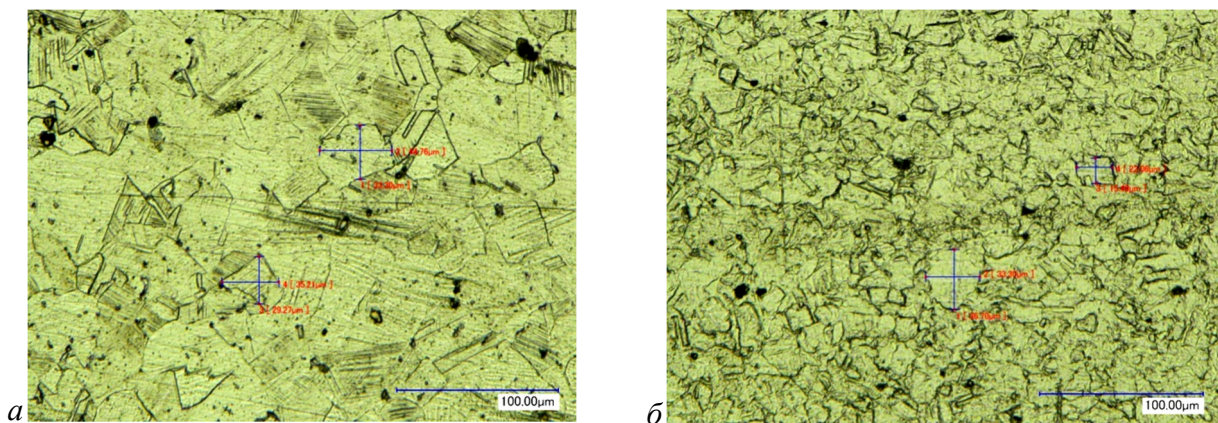


Рисунок 11 – Микроструктура стали X18N10T центральной зоны 3-й ступени:

a – заготовки; *б* – при деформировании

Двухосное растяжение в интервале температур $(20 \div 900)^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3}) \text{c}^{-1}$ титановых сплавов OT4-1 и BT6С проводилось методом выпучивания мембран с применением разработанного устройства (Глава 6). Для сравнения, проводились испытания тех же сплавов на одноосное растяжение. По результатам испытаний построены диаграммы истинное напряжение – истинная деформация и температурно-скоростные зависимости предельной степени деформации (рисунок 12). По данным микроструктурного и фрактографического анализов для условий вязкого разрушения проведен количественный замер микротрещин на шлифах и чашечек на поверхностях изломов.

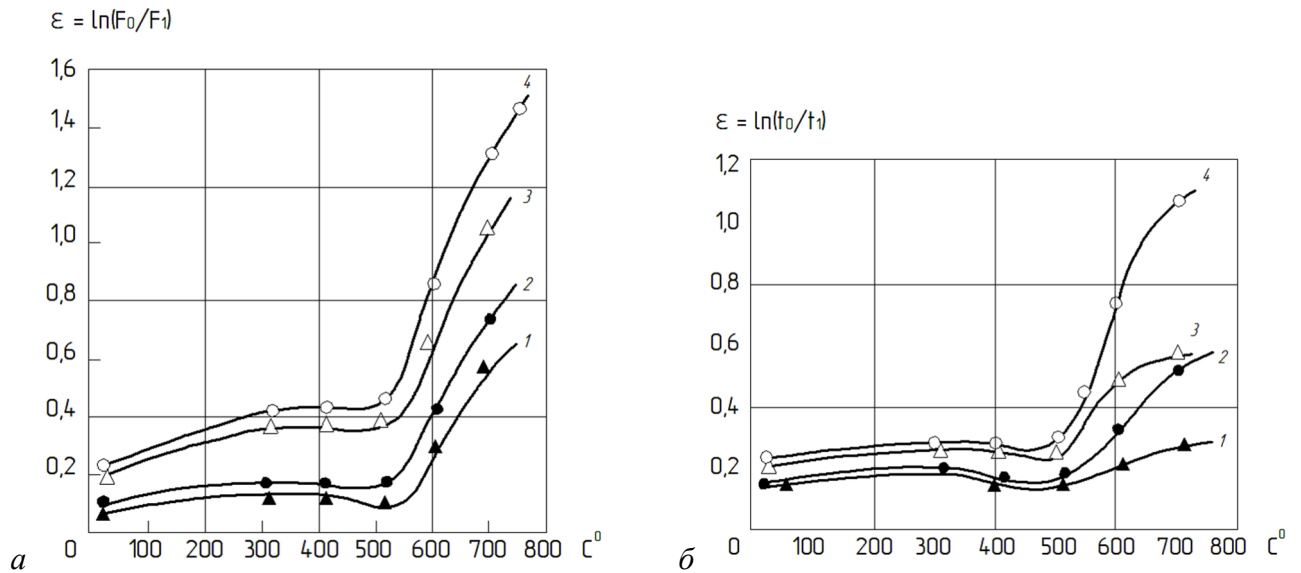


Рисунок 12 – Температурно-скоростные зависимости предельной степени деформации $\varepsilon^{\text{пред}}$ (а) при одноосном (а) и двухосном (б) растяжении сплава ОТ4-1 (\circ , \triangle) и ВТ6С (\bullet , \blacktriangle) при скоростях деформации: (\circ , \bullet) – $\dot{\varepsilon} = 4,5 \times 10^{-3}$; (\bullet , \blacktriangle) – $\dot{\varepsilon} = 5 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$

Исследование стали 50ХГФА прокатанной полосовой заготовки на клин (рисунок 13 а) включило определение механических свойств, показателей сопротивления усталости и величины зерна, которое выполнялось на продольных и поперечных образцах. Схема резки заготовки на образцы приведена на рисунке 13 б.

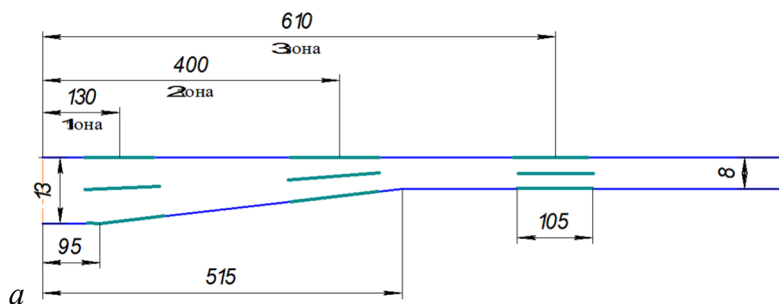
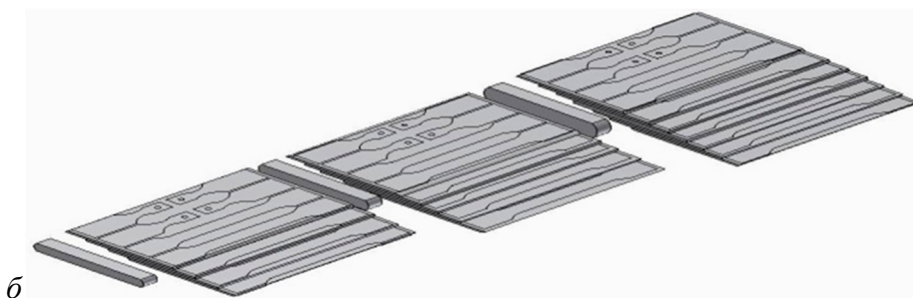


Рисунок 13 – Эскиз прокатанной на клин заготовки (а) и схема резки ее участков (б) со степенями обжатия 4%, 23% и 40% на продольные и поперечные образцы



По результатам механических испытаний продольных послойных образцов построены кривые упрочнения материала в зависимости от степени обжатия и расположения по слоям и ширине полосы (рисунок 14).

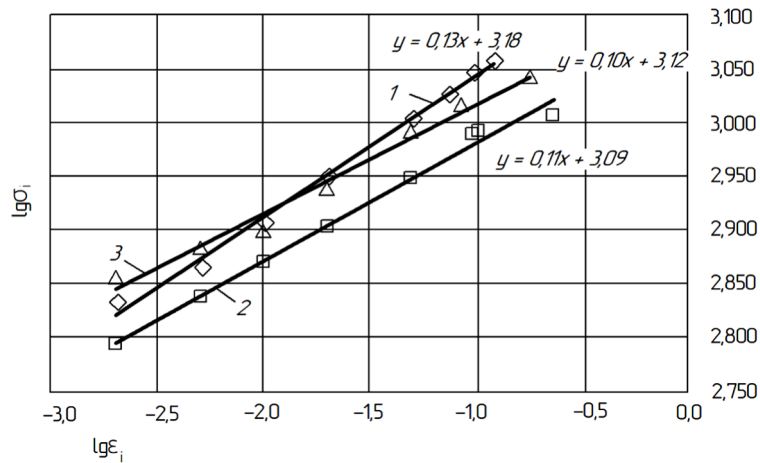


Рисунок 14 – Зависимости упрочнения послойных образцов стали 50ХГФА со степенью обжатия $\varepsilon_n = 23\%$ (номера зависимостей проставлены с поверхности прокатки)

. По результатам циклических испытаний построены кривые А. Велера. Результаты усталостных испытаний анализировались на основании данных механических испытаний (показатель деформационного упрочнения) и микроструктурного анализа (величина зерна),

Структурно-механические исследования и усталостные испытания стали 12Х17Г9АН4 проводились на листовом материале панелей, изготовленных многопереходной горячей штамповкой на молоте и холодной формовкой на прессе в одну операцию. Образцы вырезались из зон синусоидальных рифтов по вершинам и впадинам рифтов (рисунок 15).

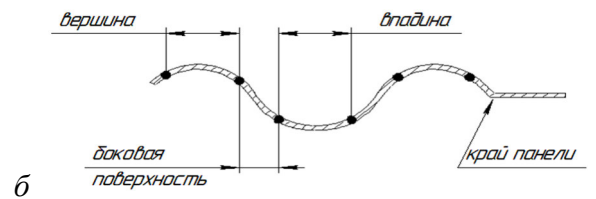
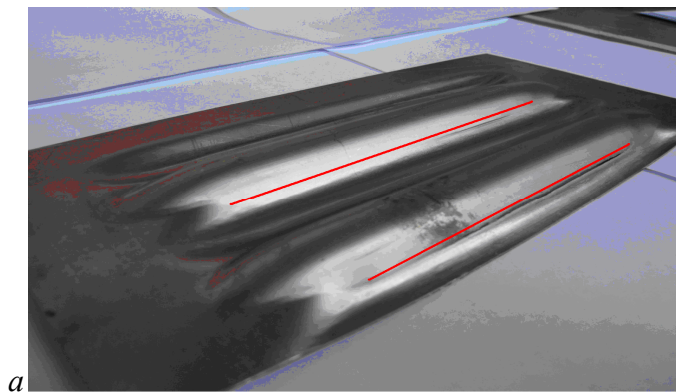


Рисунок 15 – Элемент гофрированной панели: а – места вырезки образцов; б – форма и размеры поперечного сечения рифта

По результатам испытаний и исследований построены кривые упрочнения, зависимости усталости, определена микроструктура (рисунки 16 и 17), проведен фрактографический анализ.

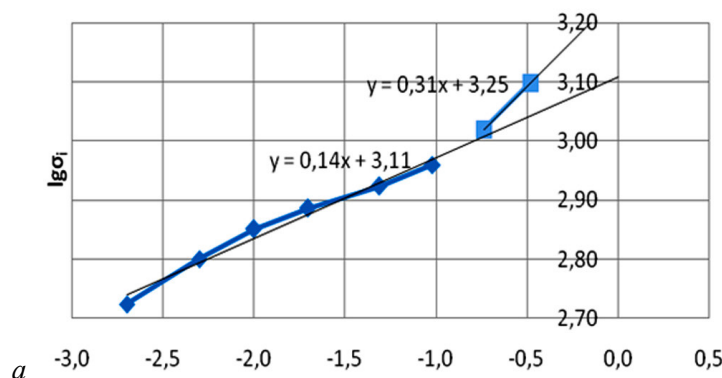


Рисунок 16 – Кривая упрочнения (а) и микроструктура (б) $\times 340$ стали 12Х17Г9АН4 панелей, изготовленных холодной формовкой на прессе (зоны вершин рифтов)

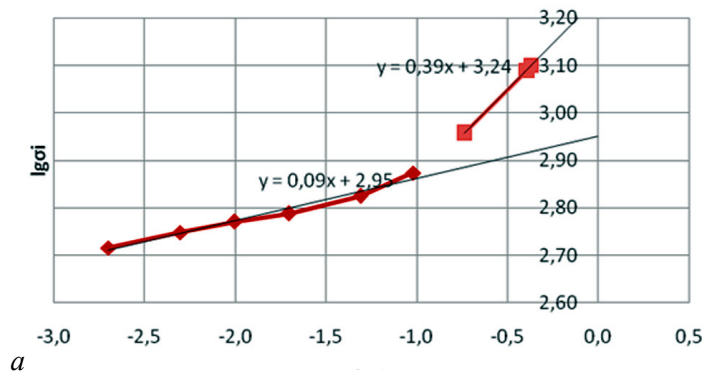


Рисунок 17 – Кривая упрочнения (а) и микроструктура (б) стали 12X17Г9АН4 ($\times 340$) панелей, изготовленных многооперационной горячей формовкой на молоте (зоны впадин рифтов)

Микроструктурные исследования деформированного чугуна с шаровидным графитом проводились на образцах, для изготовления которых четвертая часть изделия – фланца, отштампованного в открытом штампе (рисунок 18а), разделялась на слои методом электро-эрозионной резки (рисунок 18б).

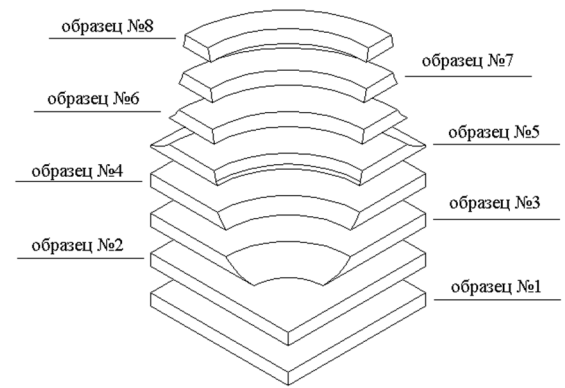


Рисунок 18 – Фотография изделия – фланца (а) и схема резки (б) его четвертой части на слои для микроструктурного анализа

Измерение величины и формы графитовых зерен (рисунок 19) проводилось на послойных и торцевых шлифах образцов. Формоизменение графитовых зерен сопоставлялось с данными напряженно-деформированного состояния, определенного математическим моделированием.

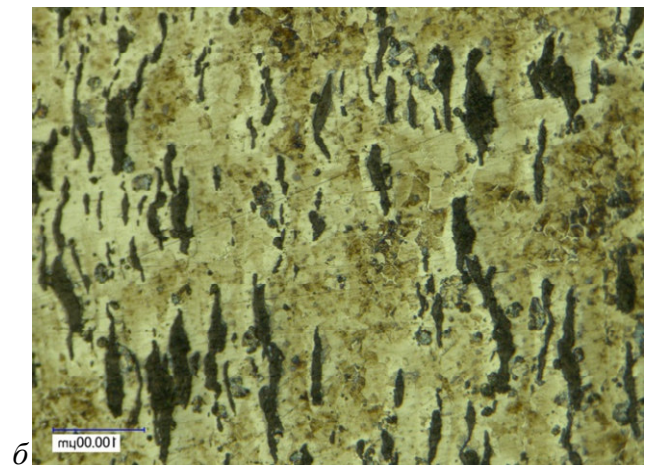
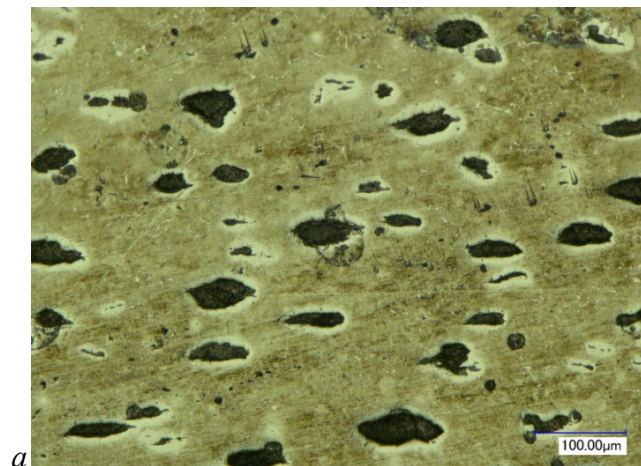


Рисунок 19 – Микроструктуры чугуна на плоскостях фланца: а – образец №7; б – образец №3

В пятой главе (Закономерности изменения структуры и дефектности деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения и их влияние на формирование механических свойств) приведены данные о структурных изменениях в металлических сплавах, деформированных в технологических испытаниях.

Закономерности структурных изменений в сталях ферритно-перлитного класса и их влияние на деформационное упрочнение

Закономерности структурных изменений в сталях ферритно-перлитного класса и их влияние на деформационное упрочнение исследовались при многопереходном холодном объемном деформировании. Для оценки влияния разных видов дефектов на развитие повреждаемости были проанализированы результаты структурно-механических и физических исследований. На их основании построены зависимости плотности и твердости от степени деформации.

Зависимости плотности ρ_M стали 10 от степени деформации e_i , приведенной на рисунке 20, показали, что для всех исследуемых зон плотность на последнем переходе имела наименьшее значение, но при этом на предыдущих переходах она изменялась немонотонно: повышение сменялось уменьшением и наоборот.

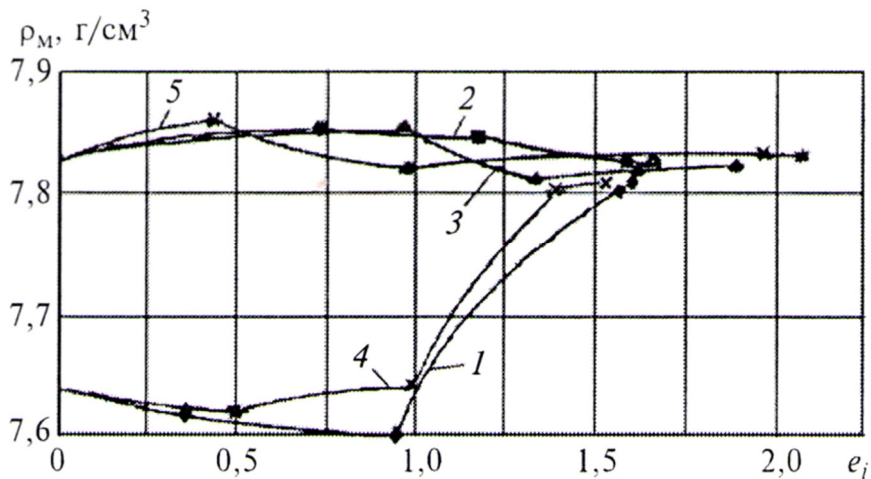


Рисунок 20 –
Зависимости плотности ρ_M стали 10 от степени деформации e_i в исследуемых зонах:
1 - \diamond ; 2 - \square ; 3 - \triangle ; 4 - \times ;
5 - *

Структурные исследования показали незначительное изменение количества зерен в исследуемых зонах на переходах обработки (рисунок 21). По мнению В.В. Рыбина это свидетельствует об отсутствии повышения двумерной дефектности в виде мезеренных границ, что характерно для развитой пластической деформации, и косвенно указывает на то, что структурные изменения происходят не на микроуровне, а на уровне субструктуры.

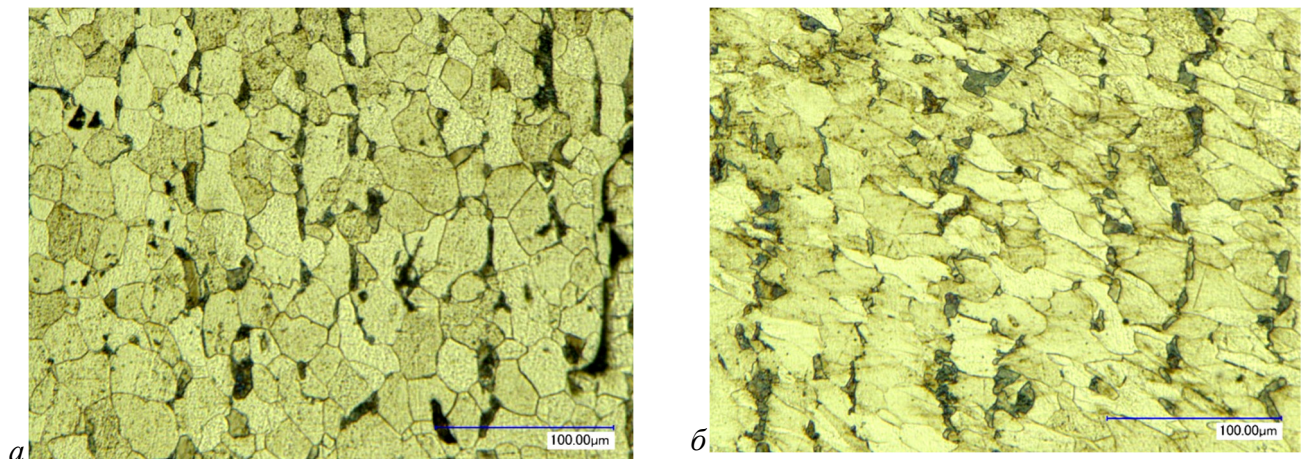


Рисунок 21 – Микроструктура стали 10 в 5-й зоне: а – 1-я операция; б – 4-я операция

Зависимости микротвердости HV стали 10 от степени деформации ϵ_i , приведенные на рисунке 22, показали монотонное повышение микротвердости материала исследуемых зон, что свидетельствует о его постоянном упрочнении. Согласно дислокационной теории это объясняется возрастающим затруднением движения индивидуальных дислокаций. Однако, как было отмечено при микроструктурном анализе, постоянного дробления зерен не наблюдалось. Следовательно, деформационное упрочнение в соответствии с положениями развитой деформации в большей степени обеспечивается движением не единичных, а групповых дислокаций на уровне субструктуры.

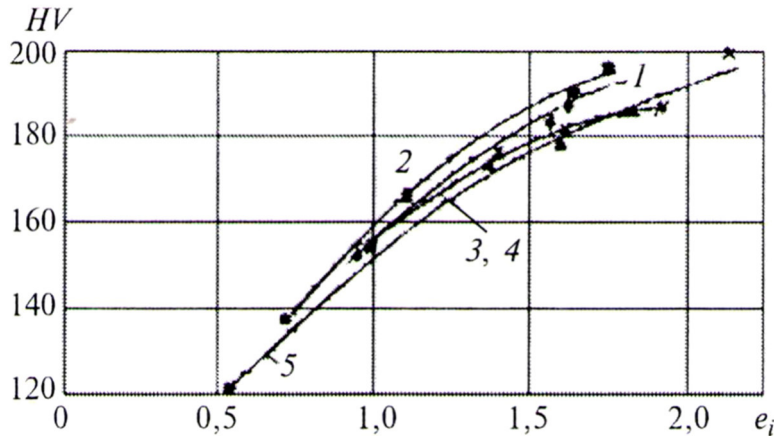


Рисунок 22 – Зависимости микротвердости HV стали 10 от степени деформации ϵ_i в исследуемых зонах:
1 – \diamond ; 2 – \square ; 3 – \triangle ;
4 – \times ; 5 – $*$

Совместное рассмотрение немонотонного изменения повреждаемости и постоянного вклада в нее одно- и двухмерных дефектов (дислокаций и межзеренных границ) позволило сделать заключение о непостоянном развитии на переходах пластической обработки трехмерных дефектов в виде микротрещин и пор. Процессы их образования или "залечивания" зависят от реализуемой механической схемы деформации: напряжения сжатия уплотняют материал, а напряжения растяжения его "разрыхляют". Это подтверждается данными напряженного состояния материала исследуемых зон на переходах обработки, полученного математическим моделированием.

Полученные результаты позволили уточнить общее уравнение связи дефектности (плотности ρ_M^n) материала с интенсивностью деформации ϵ_i^n в зависимости от внешних и внутренних факторов для многопереходного пластического деформирования, в котором учитывается изменение эффективного числа возможных мест разрушения на каждом переходе обработки

$$\rho_M^n = \rho_{M_0} \exp\left\{\varphi(M)^{n=1} \epsilon_i^{n=1} \left(K_1' + \frac{K_2'}{2} \epsilon_i\right)\right\} \exp\left\{\varphi(M)^{n=2} \epsilon_i^{n=2} \left(K_1' + \frac{K_2'}{2} \epsilon_i\right)\right\} \times \dots \quad (1)$$

$$\times \exp\left\{\varphi(M)^n \epsilon_i^n \left(K_1' + \frac{K_2'}{2} \epsilon_i\right)\right\},$$

где ρ_{M_0} – исходная плотность материала; K_1' и K_2' – коэффициенты, учитывающие соответственно переменное исходное состояние ($0 \leq K_1' \leq 1$) и влияние текущей деформации на распределение мест разрушения ($0 \leq K_2' \leq 1$); $\varphi(M) = e^{\varphi(v_\sigma, v_D) \Pi}$ – функция, учитывающая параметры механической схемы (M) деформации (v_σ и v_D – коэффициенты Лоде); $\Pi = 3\sigma_{cp}/\sigma_i$ – показатель напряженного состояния (σ_{cp} – среднее напряжение, σ_i – интенсивность напряжений); n – номер этапа пластического деформирования.

Механические свойства материалов в условиях многопереходной холодной деформации рационально оценивать с использованием обобщенных кривых деформационного упрочнения. Для стали 10 кривая приведена на рисунке 23. Упрочнение и пластичность деформируемого материала определяются по обобщенным кривым деформационного упрочнения в зависимости от накопленной на всех этапах степени деформации.

Стадийность обобщенных кривых упрочнения, как и кривые упрочнения статических испытаний, целесообразно рассматривать исходя из кинетики накопления повреждений,

которое включает периоды зарождения и распространения трещин. С этих позиций на обобщенных кривых упрочнения можно выделить участки. Первый участок характеризуется интенсивным упрочнением, обусловленный скольжением индивидуальных дислокаций. Переход к последующему участку происходит в конце интенсивного упрочнения e_i (порог упрочнения), что соответствует началу процесса фрагментации структуры.

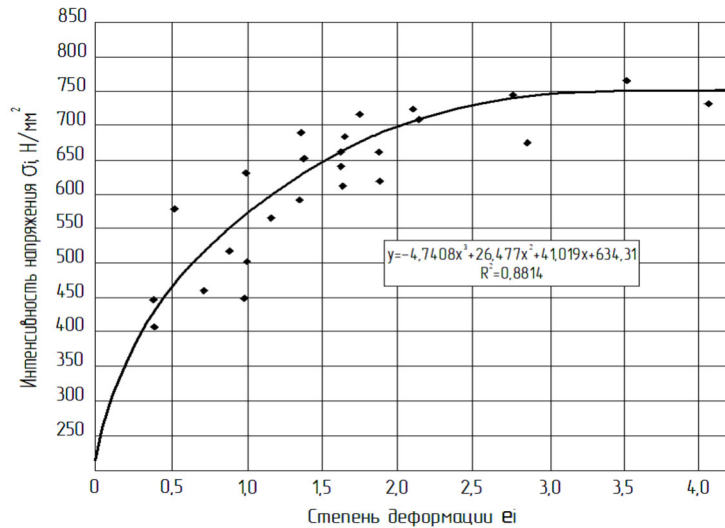


Рисунок 23 – Обобщенная кривая деформационного упрочнения стали 10

Закономерности структурных изменениях материала в условиях горячей дробной деформации определялись на примере деформирования стали аустенитного класса 12Х18Н10Т. Рассматривалось изменение формы и размера зерен выделенных зон (периферийная и центральная) ступенчатой заготовки, которые в силу неравномерности деформации, отличались степенью деформации на переходах обработки, значения которой приведены в таблице.

	1 переход	2-й переход	3 переход	4 переход
	Накопленная степень деформации на переходах			
Периферийная зона	1,2	1,6	2,0	3,5
Центральная зона	0,6	2,3	2,5	3,5
Уков на переходе	1,31	1,66	1,19	1,12
Общий уков	1,31	2,08	2,59	5,3

Микроструктура материала 1-го перехода приведена на рисунке 24.

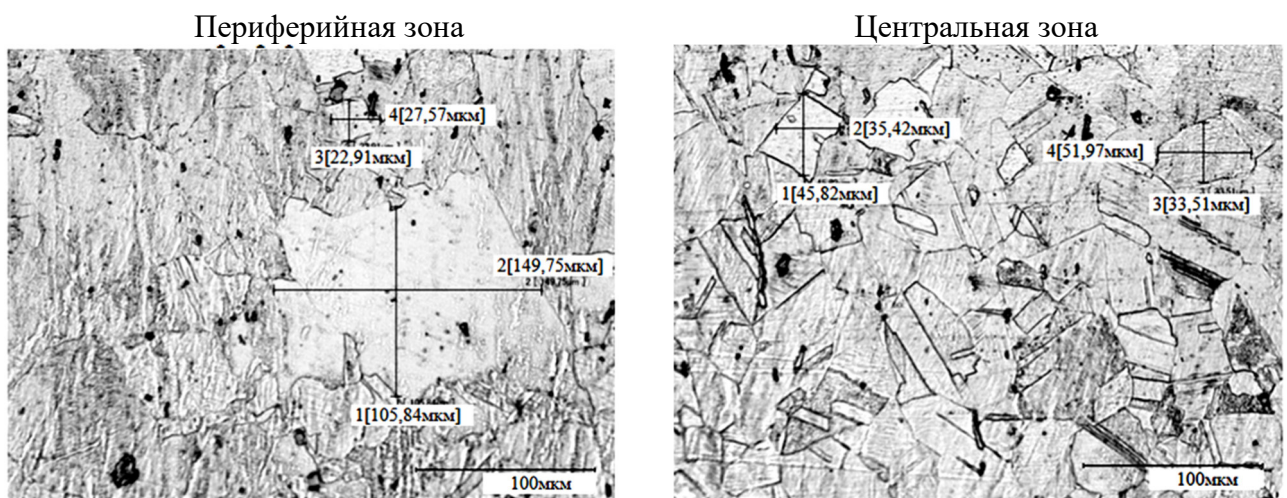


Рисунок 24 – Микроструктура стали X18H10T 1-го перехода деформирования

В периферийной зоне зерна имеют неравноосную, вытянутую по направлению течения форму, величина которых достигает $d_m^{max} = 120$ мкм (средняя площадь $a \sim 14400$ мкм²), что превышает в шесть раз величину исходного зерна (средний диаметр $d_m^{cp} \sim 20$ мкм, $a \sim 375$ мкм²). Микроструктура центральной зоны представляет собой неоднородные зерна с двойниками в виде многогранников с прямыми границами ($d_m^{cp} = 42$ мкм, $a \sim 1750$ мкм²), размер которых меньше размера зерен периферийных слоев, но превышает размер исходного зерна в три раза. Значительный рост зерна в периферийной зоне объясняется тем фактом, что деформация материала находится в интервале критических степеней деформации. При деформации реализуется зародышевый механизм рекристаллизации, идущий по границам зерен.

На 2-м переходе (рисунок 25) в периферийных слоях увеличилось количество больших зерен, что может свидетельствовать о прохождении рекристаллизации по миграционному механизму, включающему перемещение границы зерна и увеличение размеров зерна, полученного на предыдущем переходе. Объяснением является небольшая деформация на переходе $\varepsilon_2^II = 0,4$. В центральной зоне форма зерен, по сравнению с 1-м переходом, не изменилась, при этом зерна имеют меньшую величину. Следует отметить, что деформация имеет наибольшее значение из всех переходов $\varepsilon_2^II = 1,7$. Можно предположить, что рекристаллизации, как и на 1-м переходе происходит по границам зерен. Накопленная деформация достигла величины $\varepsilon_2^II = 2,3$.

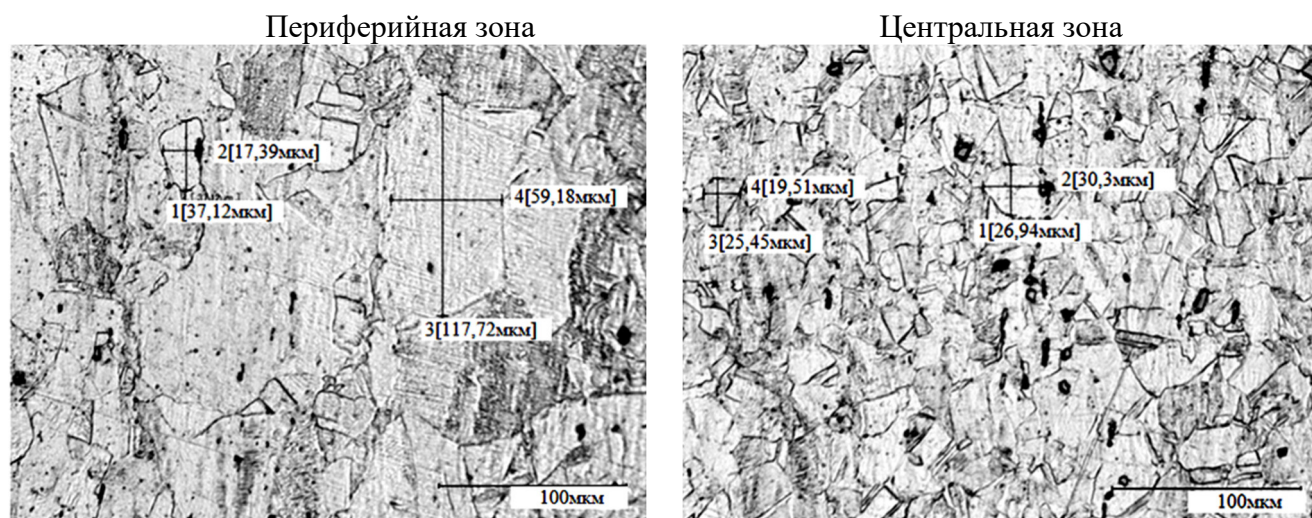


Рисунок 25 – Микроструктура стали X18N10T 2-го перехода деформирования

Микроструктура материала 3-го перехода приведена на рисунке 26.

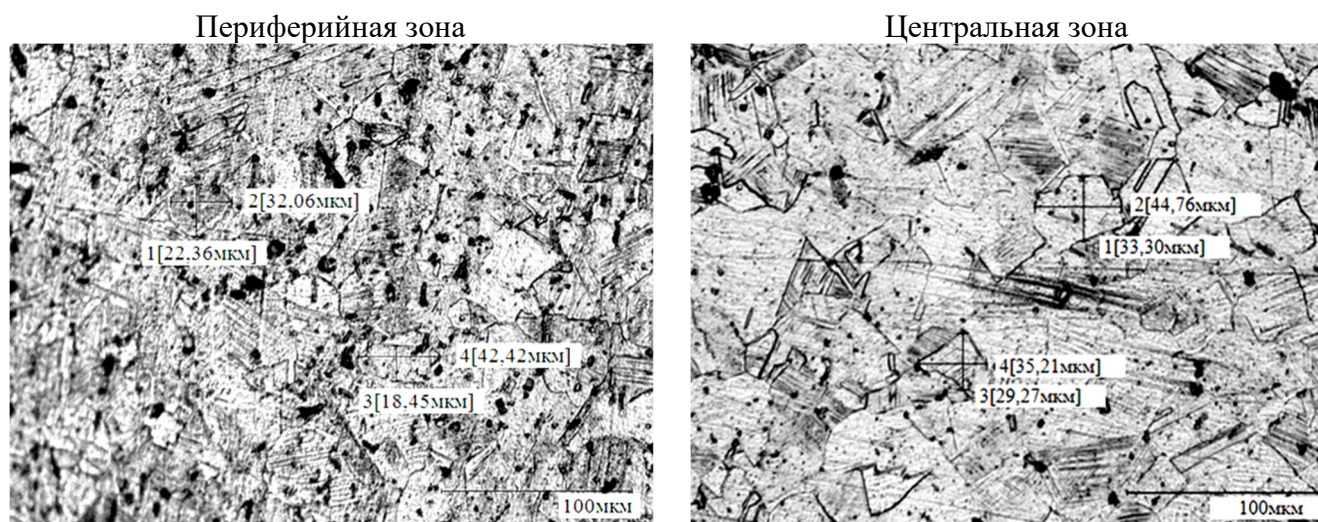


Рисунок 26 – Микроструктура стали X18N10T 3-го перехода деформирования

Микроструктура материала периферийной зоны содержит равноосные неоднородные зерна, максимальная величина которых составляет $d_m^{max} = 27$ мкм ($a \sim 800$ мкм²), вокруг больших зерен располагаются малые зерна. Накопленная деформация имеет значение $\varepsilon_2^H = 2,0$. В микроструктуре центральной зоны присутствуют неоднородные зерна с двойниками в виде многогранников с прямыми границами, средняя величина которых увеличилась по сравнению со 2-м переходом и имеет значение $d_m^{cp} = 42$ мкм ($a \sim 1200$ мкм²).

На 4-м переходе микроструктура периферийной и центральной зон практически одинаковая, содержит однородные зерна величиной $d_m \sim 20$ мкм, средняя площадь которых составила $a \sim 375$ мкм² (рисунок 27), что соответствует величине исходного недеформированного зерна проката. Величина накопленной деформации в показателе интенсивности деформации составила $\varepsilon_4 = 3,5$, в показателе общего укова $y_{общ} = 5,3$.

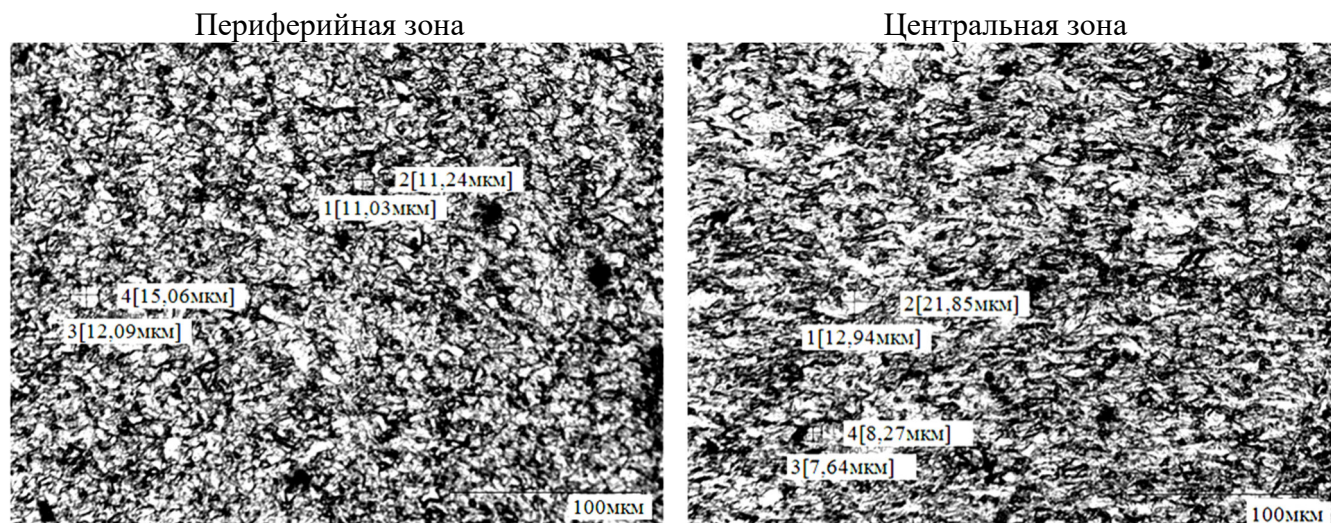


Рисунок 27 – Микроструктура стали X18H10T 4-го перехода деформирования

На основании полученных результатов построены зависимости изменения величины зерна при деформировании от степени деформации на переходах и накопленной деформации (рисунок 28).

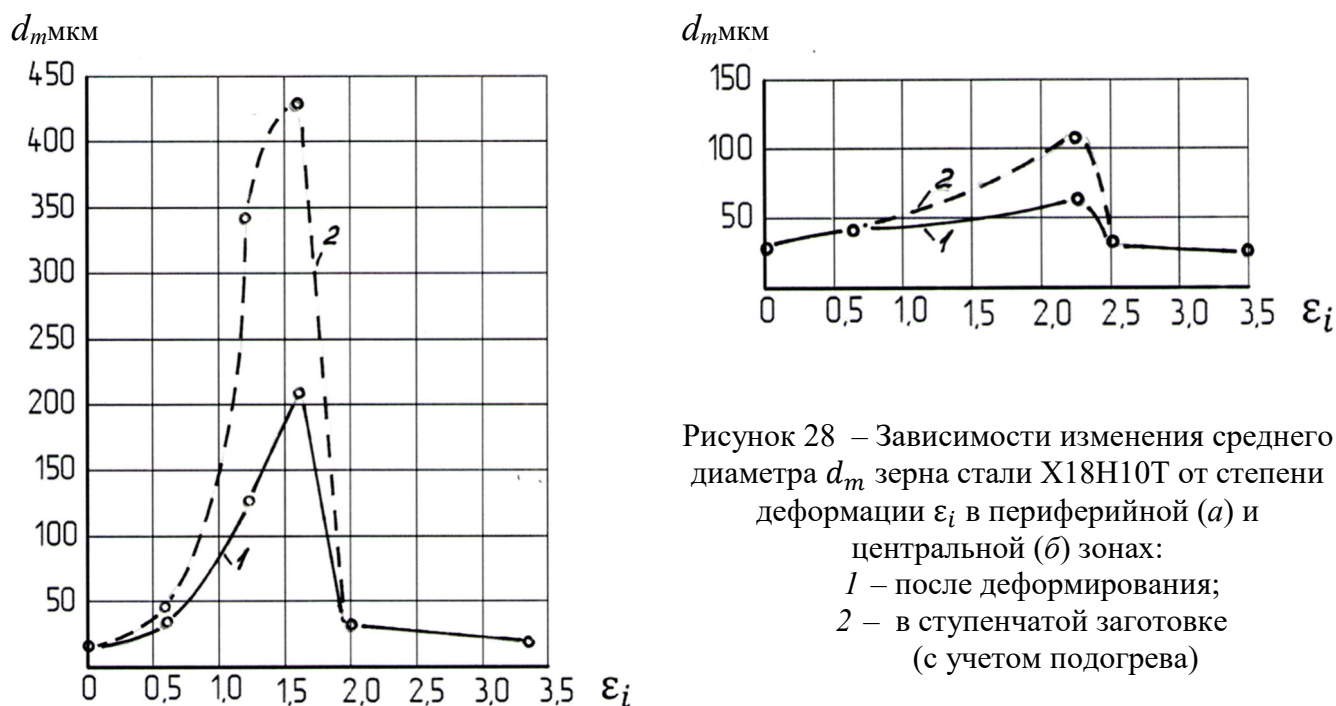


Рисунок 28 – Зависимости изменения среднего диаметра d_m зерна стали X18H10T от степени деформации ε_i в периферийной (а) и центральной (б) зонах:
1 – после деформирования;
2 – в ступенчатой заготовке (с учетом подогрева)

При оценке реализации механизмов динамической рекристаллизации следует отметить ее зависимость от условий деформации. Рекристаллизация, идущая по границам зерен, реализуется при мелкозернистой структуре и значительных степенях обработки. Рекристаллизация по миграционному механизму происходит в крупнозернистой структуре с малыми степенями деформации, а завершение динамической рекристаллизации определяется критическим значением величины накопленной деформации для материала.

Кинетика собирательной стадии рекристаллизации определялась на основании анализа микроструктуры материала заготовки.

Наибольший рост зерна соответствовал периферийным слоям 1-и ступени (рисунок 29), которая имела три подогрева (~ 40 мин.). Максимальная величина составила $d_m^{cp} = 340$ мкм ($a \sim 120000$ мкм²), что больше в три раза величины зерна при деформировании. В центральной зоне наблюдается мелкозернистая структура с округленными границами

В микроструктуре материала 2-и ступени за два подогрева без деформации произошло укрупнение зерна: в периферийных слоях в пять раз по сравнению с исходным зерном, при этом наблюдаются отдельные зерна с укрупнением до величины $d_m^{cp} = 450$ мкм ($a \sim 200000$ мкм²) (рисунок 28 а); в средних слоях – в три раза до величины $d_m^{cp} = 105$ мкм ($a \sim 11000$ мкм²),

В материала 3-и ступени по всему сечению сформировалась одинаковая микроструктура с величиной зерна $d_m^{cp} = 28$ мкм ($a \sim 600$ мкм²), которая в три раза меньше чем на 2-и ступени, однако наблюдаются зерна величиной $d_m^{max} = 36$ мкм ($a \sim 1200$ мкм²).

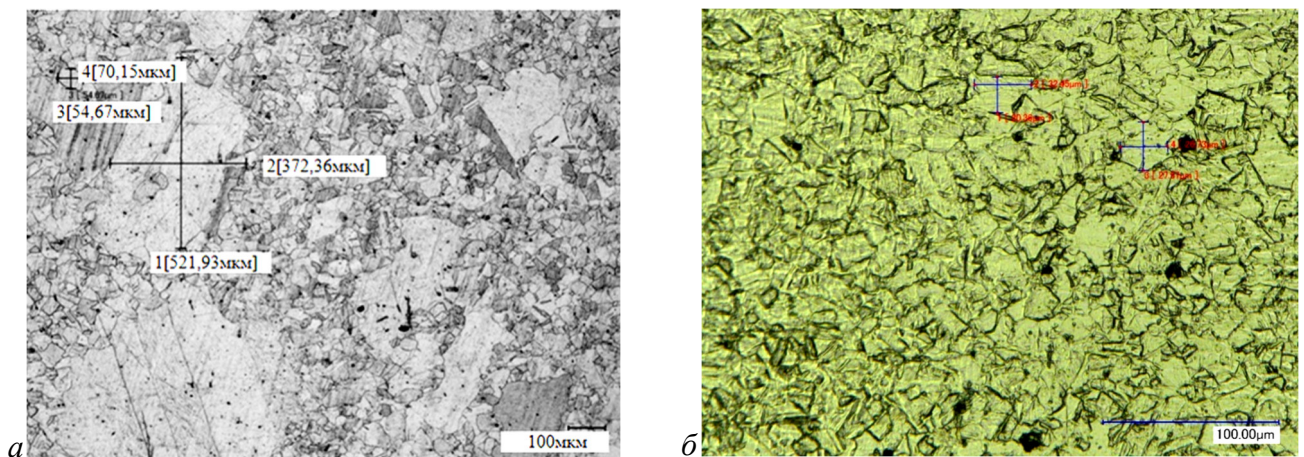


Рисунок 29 – Микроструктура стали X18H10T периферийной зоны заготовки:
а – 2-й ступени; б – 3-й ступени

При деформировании 4-й ступени по всему сечению микроструктура имеет равноосные однородные зерна величиной $d_m \approx 20$ мкм, что соответствует размеру исходного недеформированного зерна.

Анализ построенных зависимостей позволил сделать следующие выводы.

Наибольшая интенсивность динамической рекристаллизация соответствует интервалу критических степеней деформаций и зависит от размера зерна исходного материала; для деформаций, выше критических, размер зерна определяется накопленной деформацией по ходу обработки и не зависит от структуры металла на предыдущих переходах.

Стадия собирательной рекристаллизации реализуется после стадии динамической рекристаллизации при степенях деформации, соответствующих интервалу критических степеней, который для стали X18H10T имеет значение $\varepsilon_i = 1 \div 2$.

Закономерности структурных изменений и кинетика формирования дефектности листовых титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С и их влияние на предельную пластичность определялись в зависимости от жесткости напряженного состояния $\Pi = 1 \div 2$ в интервале температур (20÷900) °С. Исследование проводилось с позиции структурно-кинетической

концепции прочности, которая учитывает структуру, созданную в процессе пластической деформации, кинетику зарождения и последующего развития микротрещин.

Анализ структуры и кинетики повреждаемости проводился с использованием построенных температурных зависимостей предельной деформации (рисунок 30). Было отмечено, что независимо от схемы напряженного состояния происходит строго закономерная схема механизмов разрушения, каждому из которых соответствует характерный участок температурной зависимости предельной деформации, отличающийся величиной наклона.

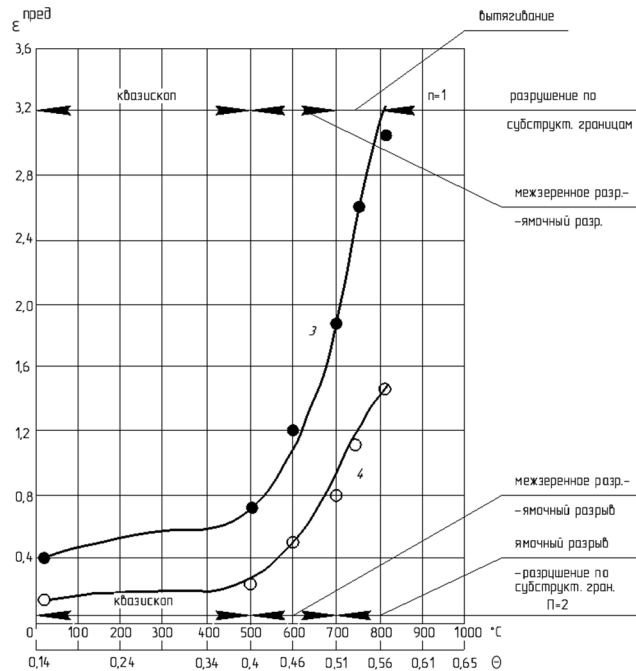


Рисунок 30 – Температурные зависимости предельной деформации $\epsilon^{\text{пред}}$ титанового сплава OT4-1 при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$:
3 – одноосное растяжение;
4 – двухосное растяжение

Металлографический анализ показал, что при одних и тех же температурно-скоростных условиях деформации при одноосном и двухосном растяжении микроструктуры имеют одинаковый характер деформационного рельефа и различную картину повреждаемости. На первом участке до температуры $\sim 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ микроструктура не отличается от недеформированной микроструктуры. На втором участке до температур $(700 \div 750) \text{ }^{\circ}\text{C}$ начинает реализовываться механизм зернограницного проскальзывания, при этом в микроструктуре наблюдается порообразование. При температурах свыше $(700 \div 750) \text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшается доля зернограницного проскальзывания в общей деформации и увеличивается доля внутризеренного скольжения. На величину порообразования влияют температура, скорость деформации и схема напряженного состояния. На примере деформации сплава OT4-1 при $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$, порообразование при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ проявляется более интенсивно чем при $\dot{\epsilon} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ (рисунок 31).

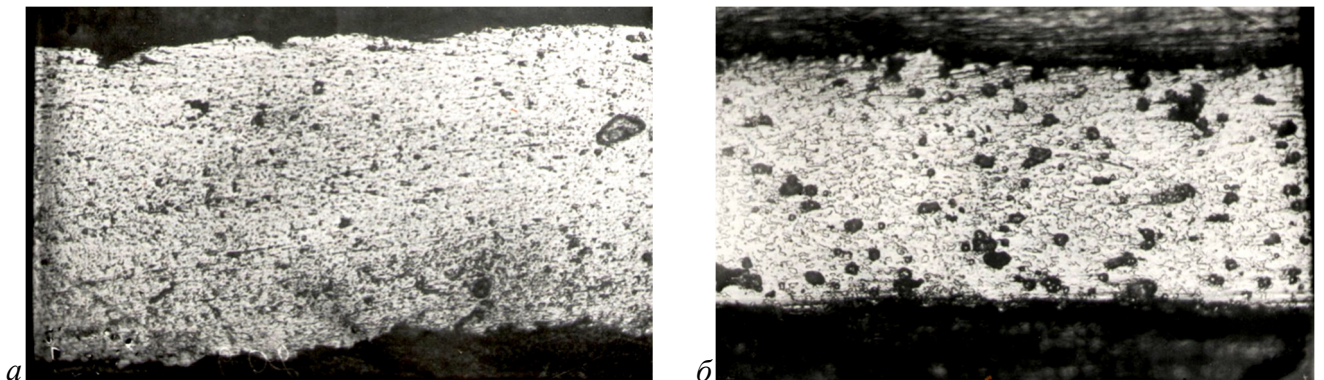


Рисунок 31 – Микроструктура титанового сплава OT4-1 при двухосном растяжении, температуре $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростях деформации $\dot{\epsilon}$: а – $4,5 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$, б – $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ($\times 340$)

Зависимости плотности микротрещин в сечениях образцов от предельной степени деформации, напряженного состояния и скорости деформации приведены на рисунке 32.

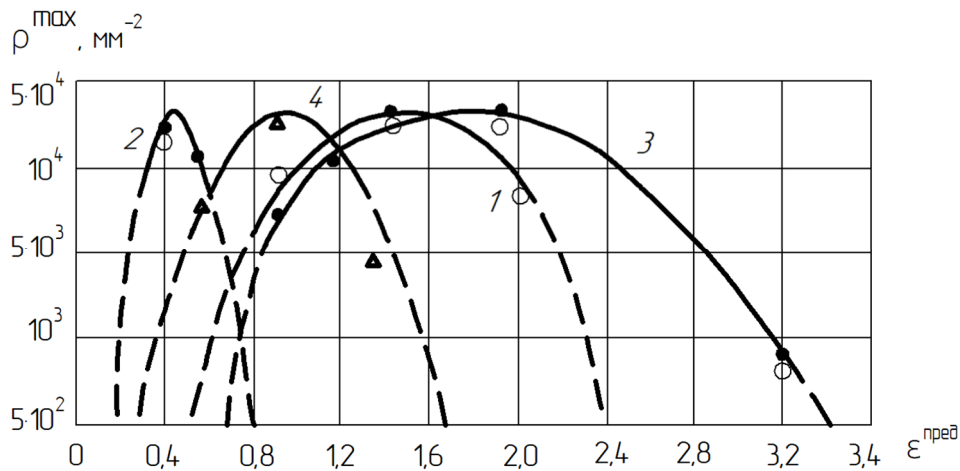


Рисунок 32 – Зависимости плотности микротрещин ρ^{max} от предельной степени деформации $\epsilon^{пред}$ титанового сплава ОТ4-1 при скоростях деформации $\dot{\epsilon}$ и схемах напряженного состояния П: 1 – $\dot{\epsilon} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ – (П= 1); 2 – $\dot{\epsilon} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ – (П= 2); 3 – $\dot{\epsilon} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ – (П= 1); 4 – $\dot{\epsilon} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ – (П= 2)

Достоверность оценки развития повреждаемости подтверждена анализом картин изломов и количественной оценкой плотности чашечек на вязких изломах (рисунок 33).

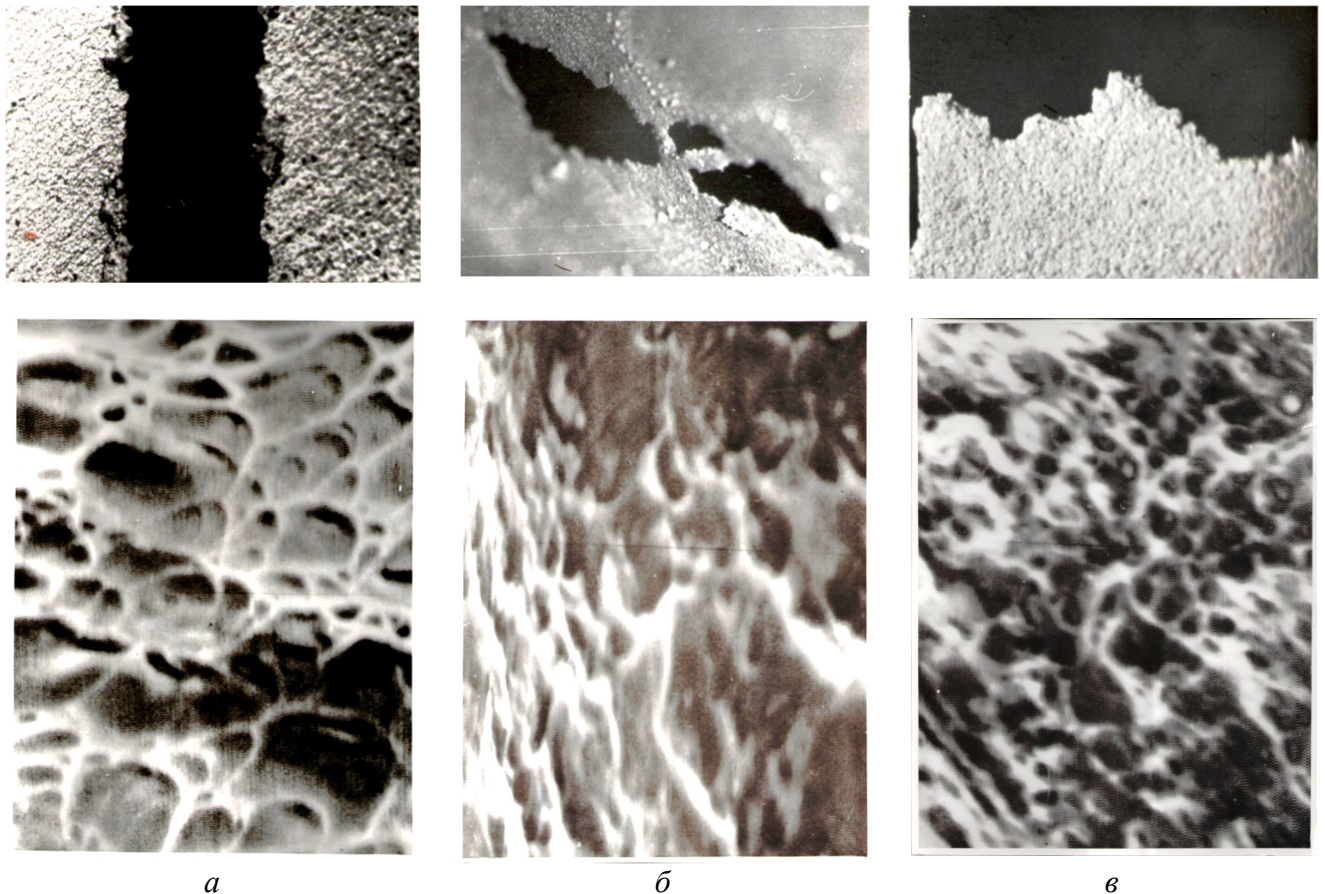


Рисунок 33 – Макро ($\times 5$), микро ($\times 1400$) фрактуры изломов титанового сплава ОТ4-1, скорость деформации $\dot{\epsilon} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, двухосное растяжение методом выпучивания, температуры $^{\circ}\text{C}$: а – 600, б – 700, в – 800

Полученные результаты оценки зарождения и развития микротрещин позволили сделать выводы: развитие повреждаемости включает два этапа: на первом – увеличение плотности, на втором – уменьшение; наибольшее значение предельной плотности микротрещин приходится на температурно-скоростные условия перехода от хрупкого к вязкому разрушению, что соответствует температурам рекристаллизационного перегиба на зависимостях предельной деформации; при увеличении жесткости напряженного состояния переход к механизмам разрушения вязкого типа происходит при более высоких температурах, чему соответствует смещение рекристаллизационного перегиба кривых предельной деформации в сторону увеличения температуры.

Выявление структурно-механических характеристик горячедеформированного металлического сплава, определяющих сопротивление усталости, было выполнено при исследовании стали 50ХГФА полосовой заготовки, прокатанной на клин. Результаты усталостных испытаний послойных образцов (рисунок 34) показали их значительное отличие. При этом следует учитывать, что деформированное состояние материала зависит, кроме степени обжатия, от его расположения по толщине и ширине прокатанной полосы.

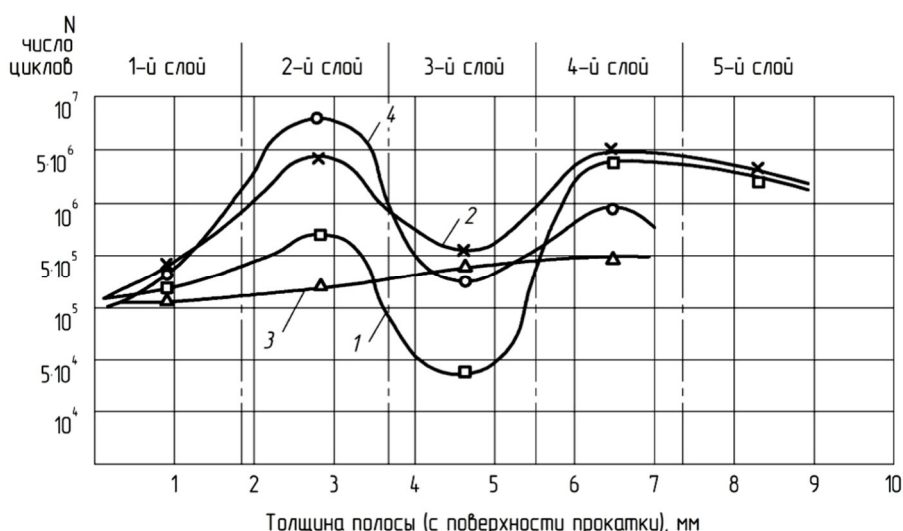


Рисунок 34 – Зависимости циклической долговечности N послойных образцов стали 50ХГФА, от степени обжатия ε_n : 1,2 – 23%; 3,4 – 40% (1,3 – срединные; 2,4 – краевые образцы)

Результаты механических испытаний аналогичных послойных образцов в виде зависимостей механических свойств от степени деформации приведены на рисунке 35.

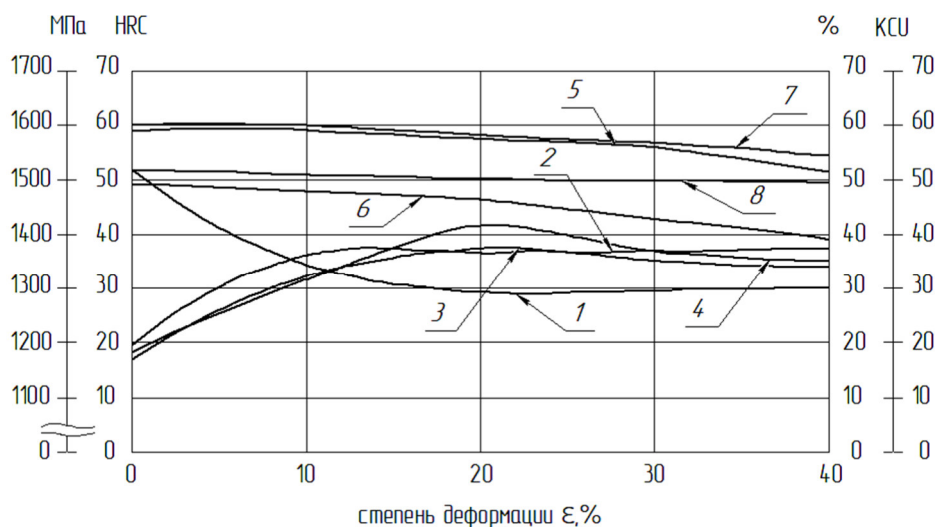


Рисунок 35 – Зависимости механических свойств стали 50ХГФА от степени обжатия: 1 – ударная вязкость; 2,3,4 – твердости поверхностей прокатки, среднего слоя, поверхности прилегания; 5 – предел прочности; 6 – предел текучести; 7 – относительное сужение; 8 – относительное удлинение

Зависимости механических свойств горячекатаной стали 50ХГФА от степени обжатия (рисунок 35) указали на их незначительные изменения. Это позволило сделать заключение, что в отличие от холоднодеформированных материалов, прочностная характеристика – показатель деформационного упрочнения на сопротивление усталости горячедеформированных металлических сплавов не влияет.

Микроструктурный анализ показал различие в размере зерна в зависимости от степени обжатия и расположения по толщине и ширине полосы. Построенная зависимость в координатах «количество циклов – размер зерна» (рисунок 36), показала повышение сопротивления усталости при уменьшении размера зерна. Наименьшее сопротивление усталости соответствует интервалу критических степеней деформации, при которых происходит интенсивный рост зерна. Полученные результаты позволили высказать мнение, что для горячедеформированного материала определяющей характеристикой сопротивления усталости является величина рекристаллизованного зерна.

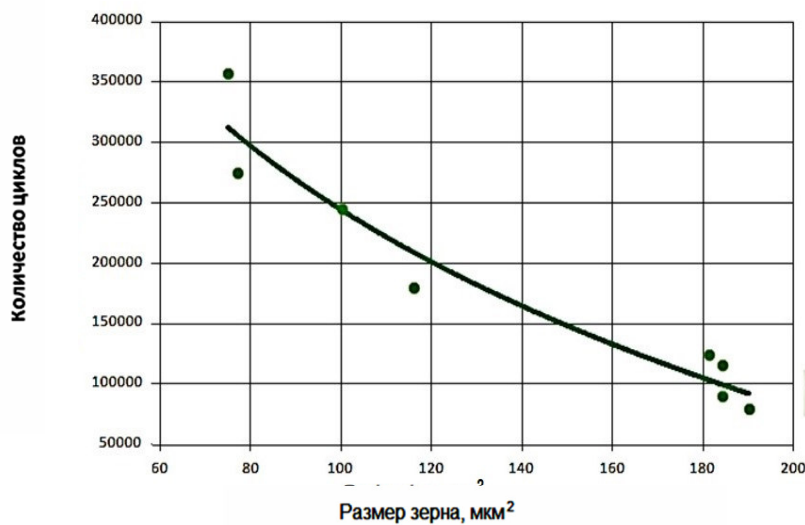


Рисунок 36 – Зависимость циклической долговечности стали 50ХГФА от размера зерна

Микроструктура стали состоит из перлитных колоний и феррита и отличается неравномерностью, которая проявилась в размере ферритной составляющей, имеющей по всей толщине до степени обжатия 23%, равноосную форму (рисунок 37 а). При больших степенях микроструктура характеризуется вытянутыми зёрнами феррита и образованием текстуры деформации (рисунок 37 б).

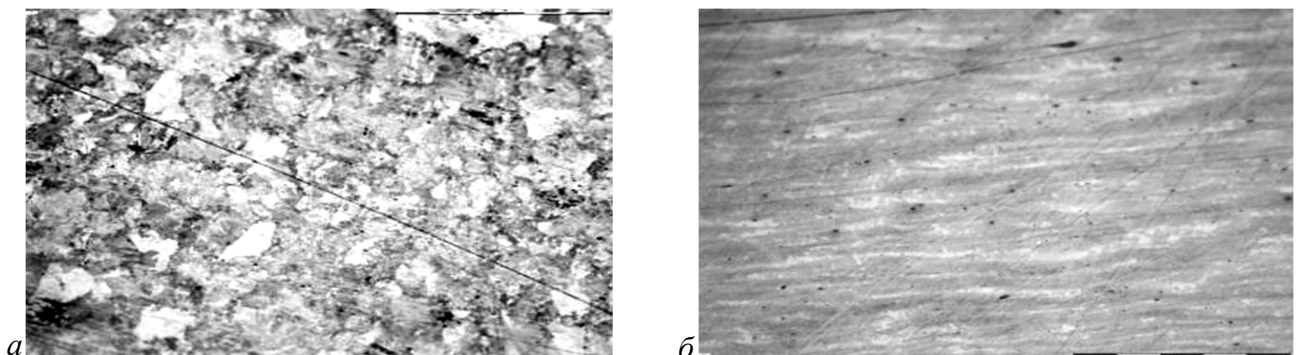


Рисунок 37 – Микроструктура стали 50ХГФА поперечного центрального сечения верхнего слоя раскатанной заготовки при степенях обжатия: а – 4%, б – 40% ($\times 200$)

В качестве значимого фактора, влияющего на сопротивление усталости, может являться наличие остаточных макро и микронапряжений. Данные рентгеноструктурного анализа, приведенные на рисунке 38, показали увеличение остаточных напряжений 3-го рода ($\Delta a/a$) по длине раскатанной полосы в восемь раз, а размеров блоков мозаики (D, мкм) в два раза.

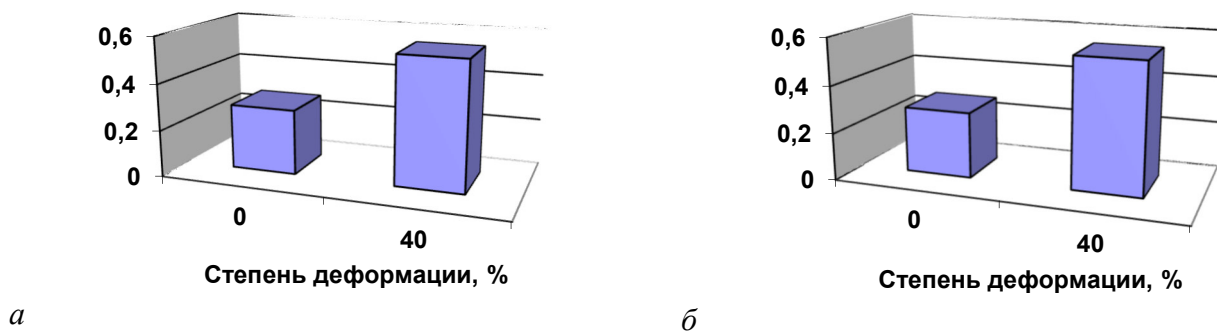


Рисунок 38 – Зависимости микронапряжений (а/а) (а) и размера блока мозаики (D, мкм) (б) стали 50XГФА от степени деформации после термообработки

Полученные результаты были сопоставлены с исследованиями усталостной прочности аустенитной стали 12X17Г9АН4 листовых гофрированных панелей, изготовленных много-переходной горячей формовки на молоте и холодной формовкой эластичной средой на прессе в одну операцию, и материала в состоянии поставки (рисунок 39).

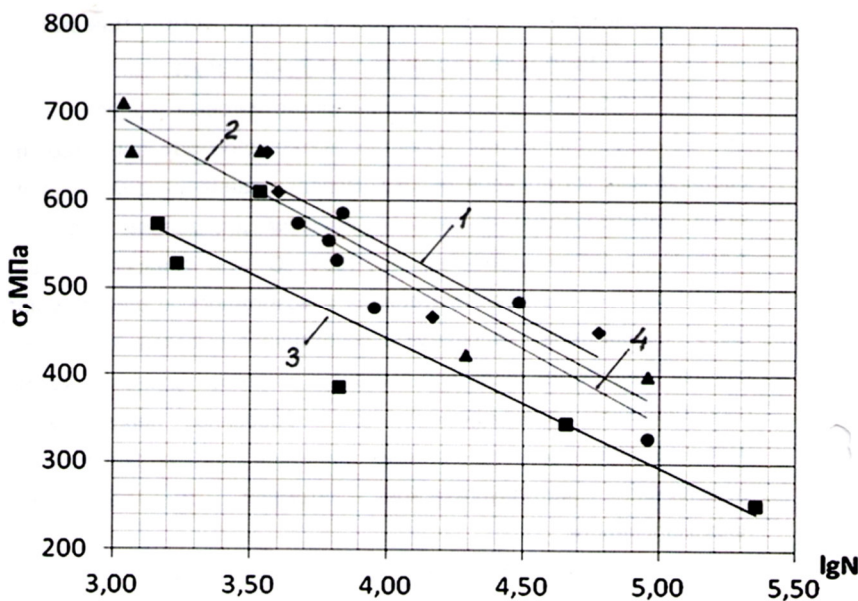


Рисунок 39 – Кривые усталости деформированной стали 12X17Г9АН4: 1 – на прессе; 2 – на молоте; 3,4 – материал в состоянии поставки в продольном и поперечном направлениях

Холодно деформированный материал на прессе (поз.1) при испытаниях показал лучшие результаты по усталостной прочности по сравнению материалом в условиях горячей обработки и состоянии поставки. Это вполне закономерно, так как при уменьшении размера зерен по их границам увеличивается сопротивление распространению трещин. Кривая усталости материала описывается выражением $y = -162,9x + 1200$.

При горячей деформации происходит рекристаллизация материала, что уменьшает сопротивление усталости (поз.2). Дополнительно, скорость деформирования на молоте выше скорости деформирования на прессе и материал тонколистовой заготовки имеет быстрое понижение температуры. Как следствие рекристаллизации металла происходит в условиях полугорячей обработки, кривая усталости определяется выражением $y = -166,3x + 1196$. В тоже время, сопротивление усталости горячедеформированного материала выше сопротивления усталости материала в состоянии поставки, которое описывается уравнениями: для продольного расположения волокон (поз.3) – $y = -147,4x + 1032$; поперечного расположения волокон (поз.4) – $y = -170,9x + 1201$.

В заключение раздела сделаны выводы. Основным параметром, влияющим на сопротивление усталости пластически деформированных металлов и сплавов в условиях горячей обработки, является размер рекристаллизованного зерна. Наименьшее

сопротивление усталости горячедеформированного материала с неразвитой текстурой деформации проявляется при наибольшем размере зерна, образование которого соответствует интервалу критических степеней рекристаллизации. В условиях развитой деформации на сопротивление усталости кроме размера зерна, влияют субструктура и остаточные напряжения.

На примере изготовленного изделия – фланца в открытом штампе из чугуна с шаровидным графитом определена его пластичность в зависимости от условий деформирования. Полученные результаты подтвердили положение, что пластичность материала является не свойством, а состоянием материала и определяется условиями деформации: скоростью, температурой, степенью и механической схемой. Наиболее значимым фактором ее повышения считается деформирование в состоянии всестороннего неравномерного сжатия. Его можно создать, применяя специальные приемы, имитирующие гидростатическое давление, в частности боковое давление со стороны стенок инструмента, что было использовано при изготовлении фланца. Деформированное состояние материала поковки характеризуется значительной неравномерностью деформации. Наибольшую деформацию $\varepsilon_i = 3,5 \div 5,1$ материал имеет в основании фланца, при этом максимальное значение соответствует зоне вытекания материала из гравюры в заусенец (рисунок 40, поз. 1). Интенсивность напряженного состояния материала в основании фланца имеет значения $(950 \div 1140)$ МПа. Зерна графита потеряли сферическую форму, стали более мелкими и вытянутыми. По мере перехода к цилиндрической части фланца микроструктурный анализ показал в большей степени сохранение сферической формы зерен графита (рисунок 40, поз. 4). Интенсивность деформации материала имеет значения в интервале $\varepsilon_i = 1,1 \div 2,8$.

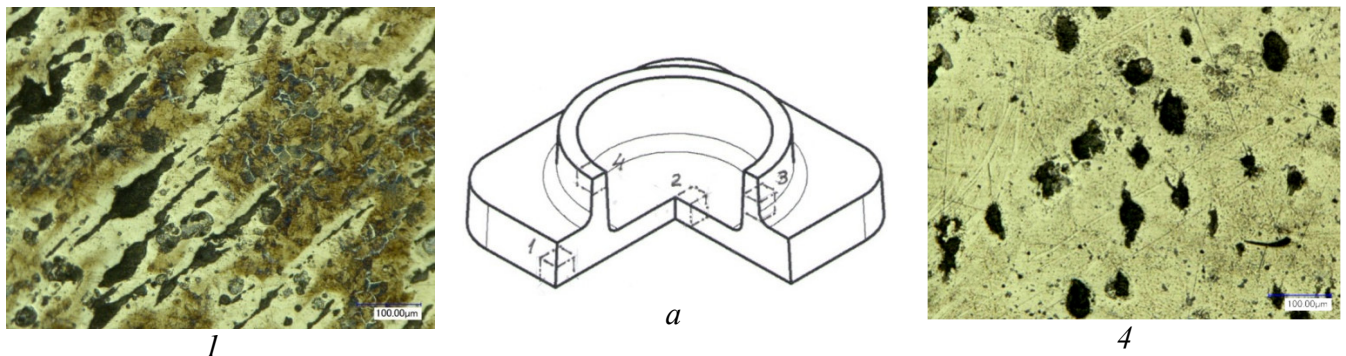


Рисунок 40 – Форма графитных включений в исследуемых зонах изделия (а):
1 – крайняя зона основания фланца; 4 – верхняя зона цилиндрической части фланца

По результатам исследования сделан вывод, что чугун с шаровидным графитом и ферритной матрицей обладает удовлетворительной пластичностью в условиях горячей объемной штамповки в открытом штампе при условии создания всестороннего неравномерного сжатия.

В шестой главе (Практическое применение результатов работы) приведены сведения по разработке высокотемпературного испытания тонколистовых материалов на двухосное растяжение методом выпучивания мембран, инженерных решениях оценки механических свойств металлических сплавов в процессах многопереходного деформирования и оптимизации технологических процессов изготовления металлоизделий из малопластичных сплавов.

Для высокотемпературного испытания тонколистовых материалов на двухосное растяжение методом выпучивания мембран в интервале температур $(20 \div 900)$ °С и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3})\text{с}^{-1}$ была разработана конструкция устройства, основанная на техническом решении, при котором в качестве промежуточной среды в устройстве вместо жидкости, была использована сыпучая среда (рисунок 41 а, б). Разработанная геометрия рабочих элементов устройства обеспечила перемещение сыпучей среды аналогично всестороннему давлению жидкости при выпучивании образцов (рисунок 41 в). Приспособление для испытания было разработано для двух видов испытательных машин ЦДМУ-30 и МТЛ-10Г.



Рисунок 41 – Схема испытания листового материала методом выпучивания сыпучей средой: *а* – исходное положение: 1 – диафрагма, 2 – рабочая среда, 3 – образец - мембрана, 4 – матрица, 5 – втулка, 7 – пуансон; *б* – выпучивание мембраны - образца; *в* – фотография выпученных образцов из титанового сплава ОТ4-1

Оптимизация технологических процессов изготовления металлоизделий из листовых титановых сплавов основана на использовании температурно-скоростных зависимостей предельной пластичности, полученных при исследованиях на двухосное растяжение методом выпучивания. На основе зависимостей предельной пластичности исследуемых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С определен оптимальный интервал температур формовки ($650\div 800$) °С, обеспечивающий максимальную их пластичность.

Для глубокой вытяжки цилиндрических изделий типа "баллон" разработана оригинальная конструкция штампа, в которой нагрев ее рабочих элементов и заготовки выполняется электро-контактным способом с дифференцированным нагревом заготовки в радиальном направлении (рисунок 42 *б*). Внедрение данных технологий для изготовления деталей летательных аппаратов на уровне опытного производства подтверждено актом НАЗ «Сокол» - филиала АО «РСК «МиГ».

Разработанная технология изготовления листовых гофрированных панелей (рисунок 42 *а*) основана на применении метода газо-компрессионной штамповки в изотермических условиях (~ 900 °С) с применением керамических штампов со встроенными нагревателями, которая обеспечивает постоянную температуру, в том числе и нагреваемой заготовки в процессе ее формообразования.

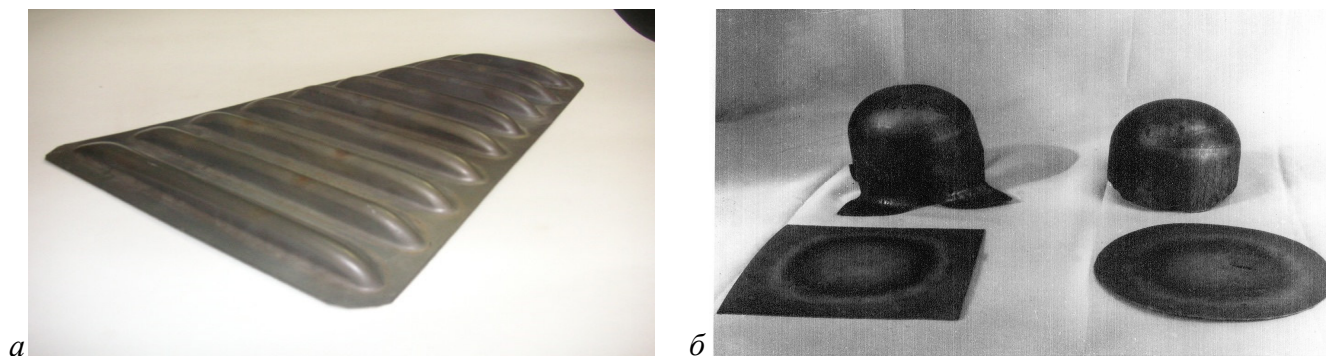


Рисунок 42 – Фотография листовой гофрированной панели (*а*) и заготовок баллонов (*б*)

Для многопереходного холодного деформирования материалов расширена информационная база проектирования процессов высадки крепежных изделий из малоуглеродистых и борсодержащих сталей. База проектирования включает обобщенные кривые деформационного упрочнения применяемых сталей, построенных на основании разработанной методики, и значения накопленной степени деформации на переходах высадки.

Для горячей дробной деформации применительно к процессам изготовления кованных поковок из сталей аустенитного класса оптимизированы технологии их изготовления с использованием построенных зависимостей рекристаллизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное содержание диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана научно-технологическая концепция формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения, основанная на установлении закономерностей поэтапного изменения их структурного состояния с учетом накопленной степени деформации, и обеспечивающая получение изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами.
2. Определен алгоритм проведения технологических и структурных исследований в условиях сложного нагружения с учетом накопленной степени деформации на этапах деформирования.
3. Разработано программное обеспечение для количественного обсчета параметров микроструктуры и анализа структурно-механических характеристик металлических сплавов. Для количественной оценки холоднодеформированного состояния и оценки рекристаллизации горячедеформированных сталей и сплавов разработаны программы для ЭВМ с использованием программного обеспечения NI Vision в среде Lab VIEW и бинаризации фотографий микроструктуры (Свидетельства государственной регистрации № 2914613502 от 27.03.14 г. и № 2015611190 от 26.01.15 г.). Для анализа структурно-механических характеристик металлических материалов при многоэтапном пластическом деформировании разработана программа для ЭВМ с использованием языка программирования C++ с возможностью обсчета микроструктуры в интервале от 100 до 1000 крат на любом виде микроскопов (Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614913 от 31.03.21 г.).
4. Разработано методическое обеспечение определения структурно-механических характеристик материалов в условиях сложного нагружения. Для оценки упрочнения холоднодеформированного материала разработана методика построения обобщенных кривых деформационного упрочнения. Для прогнозирования процесса рекристаллизации разработан способ построения зависимостей средней величины зерна от интенсивности деформации и температуры.
5. Установлен способ прогнозирования циклической долговечности горячедеформированных металлических материалов, основанный на выявленном положении, что основным определяющим параметром является размер зерна. Экспериментальное подтверждение выполнено на основании комплексных структурно-механических исследований и испытаний на циклическую долговечность деформированных материалов: прокатанной полосовой рессорной стали 50ХГФА при 1200 °С в диапазоне обжатий до 40% и листовой аустенитной стали в условиях многопереходной формовки гофрированных панелей (Патент № 2 619 480 С1, МПКG 01N3/32 от 16.05.2017 г.).
6. Установлена основная закономерность изменения структурного состояния в сталях ферритно-перлитного класса при многопереходном холодном объемном деформировании, которое характеризуется немонотонным развитием трехмерной дефектности, о чем свидетельствует изменение плотности материала, как характеристики общей дефектности. Получено математическое описание изменения повреждаемости, представленное в виде общего уравнения связи дефектности материала со степенью деформации, в котором учитываются изменения эффективного числа возможных мест разрушения на каждом этапе обработки.
7. Выявлены закономерности протекания стадий рекристаллизации сталей аустенитного класса при горячем дробном деформировании в зависимости от степени деформации на переходах, накопленной степени деформации, времени выдержки при фиксированной температуре и величины зерна на переходах обработки. Установлено, что максимальный рост зерна на стадиях динамической и собирательной рекристаллизации происходит при обработке недеформированного материала в интервале критических степеней деформации. Для стали

X18N9T интервал критических степеней деформаций имеет значение $e_i = 0,6 \div 2,3$, в показателе величина укова $y = (1,06 \div 2,08)$.

8. Определены закономерности изменений структуры и дефектности тонколистовых титановых сплавов в условиях высокотемпературного двухосного растяжения методом выпучивания мембран в интервале температур $(20 \div 900) ^\circ\text{C}$ и скоростей деформации $(10^{-1} \div 10^{-3}) \text{ c}^{-1}$. Впервые для испытаний разработана принципиально новая конструкция устройства для выпучивания с использованием промежуточной сыпучей среды (Авторские свидетельства № 1194141, МКИ³ G 01N3/10 от 22.07.1985г.; № 1299264, МКИ³ G 01N 3/08 от 22.11.1986; Евразийский патент № 040659, заявка № 202100064 от 29.12.2020 г, патент выдан 12.07.22 г). Установлено, что жесткость напряженного состояния не влияет на последовательность изменения характера микроструктуры, что подтверждается одинаковой сменой механизмов разрушения на температурно-скоростных зависимостях предельной деформации. Повышение жесткости напряженного состояния интенсифицирует развитие дефектности, чему соответствует смещение точек рекристаллизационного перегиба кривых предельных деформации в сторону увеличения температуры и уменьшения предельной деформации.

9. Подтверждено положение, что всестороннее неравномерное сжатие материала при деформировании повышает его пластичность. За счет применения специального приема, в виде создания бокового давления на заготовку со стороны стенок инструмента, изготовлено объемное изделие из чугуна с шаровидным графитом деформированием в открытом штампе.

10. Разработаны и опробованы в производственных условиях технологии: тонколистовой вытяжки цилиндрических изделий типа "баллон" с нагревом элементов штампа и заготовки электро-контактным способом (Авторское свидетельство № 1517213, МКИ³ G 01N3/10 от 22.06.1989 г); газо-компрессионная штамповка листовых гофрированных панелей в керамических штампах со встроенными нагревателями, позволившие впервые изготовить изделия из малопластичных титановых сплавов OT4-1, BT6C и BT13 (Авторское свидетельство № 1814234, МКИ³ B 21 D 26/02 от 11.10.1992 г.).

11. Результаты диссертационной работы, в соответствии с представленными актами, имеют промышленное внедрение на предприятиях:

- на ПАО «Нормаль» расширена информационная база проектирования процессов высадки крепежных изделий из малоуглеродистых и борсодержащих сталей, основанная на разработке методики и построения обобщенных кривых деформационного упрочнения;
- на СОВИНТЕХ-АВТО оптимизированы условия горячего деформирования листовых заготовок из сталей аустенитного класса и полосовых заготовок рессорной стали изделий, работающих в условиях усталостного нагружения, на основе выявления структурного параметра – величины зерна, как основной определяющей характеристики;
- на НАЗ «Сокол» - филиал АО «РСК «МиГ» выполнено внедрение на уровне опытного производства процессов изготовления изделий из тонколистовых титановых сплавов: горячей формовки и газо-компрессионной штамповки в керамических штампах листовых гофрированных панелей; глубокой вытяжки цилиндрических изделий с неравномерным электро-контактным нагревом заготовки;
- на ООО «Метмаш» уточнены технологические режимы деформирования сталей аустенитного класса, оптимизирована конструкция технологической оснастки и расширена номенклатура потенциальных кованных изделий;
- на АО «ПО «Горизонт» уточнены режимы деформирования конструкционных углеродистых сталей, расширена номенклатура потенциальных изделий.

12. Определены перспективы дальнейшей разработки темы:

- увеличение числа обобщенных кривых упрочнения материалов для оценки их возможного упрочнения при изготовлении изделий и анализа стойкости инструмента при их применении;
- определение кинетики роста зерен на стадиях процесса рекристаллизации и построение зависимостей средней величины зерна от температуры и накопленной степени деформации, в том числе и после проведения отжигов с разной длительностью, для условий горячей дробной деформации сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов;

- исследование и установление закономерностей структурообразования и формирования дефектности титановых сплавов, таких как ВТ14 и ВТ20, в условиях теплой и горячей деформации и «жесткого» нагружения и построение температурно-скоростных зависимостей предельной пластичности;
- определение зависимостей предельной пластичности от показателя напряженного состояния малопластичных материалов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Пачурин Г.В., Галкин В.В., Власов В.А., Меженин Н.А. Усталостное разрушение при разных температурах и долговечность штампованных металлоизделий: монография / Г.В. Пачурин [и др.]; под общей ред. Г.В. Пачурина; НГТУ. – Н. Новгород, 2010. 169 с.
2. Пачурин, В.Г. Закономерности изменения структурно-механических свойств металла в изделиях с клиновым профилем, получаемого операцией раскатки / В.Г. Пачурин, **В.В. Галкин**, Г.В. Пачурин, А.А. Дербенев: Перспективные технологии в XXI веке. В 2-х книгах. К 2.: монография / под общ. ред. С.В. Куприенко; SWorld. – Одесса: Куприенко С.В., 2013. – 155 с. ISBN978-966-2769-20-3 (С. 59-78; 148-149).
3. **Галкин В.В.**, Гаврилов Г.Н., Дербенев А.А., Братухин А.В. Инженерные решения оценки механических свойств холоднодеформированных металлических материалов в условиях многоэтапной обработки: монография / В.В. Галкин [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород, 2019. –100 с.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в Международных базах данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК Минобрнауки РФ (Web of Science, Scopus, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, GeoRef)

4. Дубинский, В.Н. Горячая деформация чугуна с шаровидным графитом / В.Н. Дубинский, И.О. Леушин, В.А. Коровин, В.В. **Галкин**, А.Н. Грачев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – № 1. – С. 30-34 (*S^ol^ous*).
5. Dubinskii, V.N. Hot deformation of cast iron with globular graphite / V.N. Dubinskii, I.O. Leushin, V.A. Korovin, V.V. **Galkin**, A.N. Grachev // Steel in Transl. – 2007. – №37. – С.11-13 (*S^ol^ous*).
6. **Галкин, В.В.** Влияние повреждаемости структуры при многоэтапной холодной деформации на механические свойства малоуглеродистых и борсодержащих сталей / В.В. Галкин, А.А. Дербенев // Вестник машиностроения. – 2019. – №1. – С.32-38 (*S^ol^ous*).
7. Pachurin, V.G. Structure and mechanical properties of a wedge-rolled steel skelp / V.G. Pachurin, **V.V. Galkin**, G.V. Pachurin, M.V. Mukhina, Zh.V. Smirnova, E.A. Chelnokova // Materials Science and Engineering 1100(2021) 012010. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1100/1/012010 (*S^ol^ous*).
8. Pachurin, V.G. The effect of grain size on the cycle life of spring steel 50CrMnV / V.G. Pachurin, **V.V. Galkin**, A.A. Filippov, G.V. Pachurin, M.V. Mukhina, Zh.V. Smirnova // Materials Science and Engineering 1111(2021) 012041. IOP Publishing (*S^ol^ous*).
9. **Galkin, V. V.** The issue of low resistance of punches when heading of sunk screw made of ferrite-pearlite steels / V.V. Galkin, G.N. Gavrilov, S.V. Ivanov, A.V. Bratuknin. // Materials Science and Engineering 971(2020) 042024. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/971/4/042024.209 (*S^ol^ous*).
10. **Галкин, В.В.** Рекристаллизация аустенитной стали X18H10T при дробной горячей деформации / В.В. Галкин, А.Д. Рябцев, Г.Н. Гаврилов, Е.Г. Терещенко, А.В. Вашурин // Вестник машиностроения. – 2021. – №11. – С.78-83 (*S^ol^ous*).
11. **Galkin, V. V.** Recrystallization of Austenitic Steel in Hot Fractional Deformation / V.V. Galkin, G.N. Gavrilov, A.D. Ryabtsev, E.G. Tereshchenko, A.V. Vashurin // Russian Engineering Research, 2022, Vol. 42, No 2 pp. 138 – 144 (*S^ol^ous*).
12. **Galkin, V. V.** Investigation of Technological Possibility of Manufacturing Volumetric Shaped Ductile Cast Iron Products in Open Dies / V.V. Galkin, A.A. Kurkin, G.N. Gavrilov, I.O. Kulikov, E.O. Bazhenov // Materials. 2023, 16, 274 (*S^ol^ous*).

Публикации в научных изданиях, индексируемых базой данных Russian Science Citation Index (RSCI)

13. **Галкин, В.В.** Устройство для испытания листовых образцов на двухосное растяжение при высоких температурах / В.В. Галкин, М.А. Золотов, В.А., И.Г. Чиженков // Заводская лаборатория. – 1987. – №4. – С. 87-89.

14. **Галкин, В.В.** Вопросы оценки деформации металла методами математического моделирования и экспериментальных исследований/ В.В. Галкин, А.А. Дербенев, Е.Г. Терещенко // Заводская лаборатория. – 2014. – №6 (том 80). – С. 62-65.

Публикации в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

15. Золотов. М.А. Вытяжка деталей с дифференцированным нагревом заготовок в радиальном направлении/ М.А. Золотов. **В.В. Галкин**, М.П. Шевченко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 1990. – №7. – С.3-7.

16. **Галкин, В.В.** К вопросу оценки ресурса пластичности тонколистового титанового сплава ОТ4-1 в технологии горячей формовки / В.В.Галкин, А.С.Белкин, А.А.Карташев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2001. – №12. – С.3-7.

17. **Галкин В.В.** Анализ работоспособности малолистовой рессоры из листов, полученных обработкой полосового проката / В.В. Галкин, Ф.П. Михаленко, П.В. Уланов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2001. – №8. – С. 3-7.

18. **Галкин, В.В.** Моделирование процесса прокатки заготовок рессор переменного сечения / В.В. Галкин, П.В. Уланов, Г.В. Пачурин // Известия СНЦ РАН. Самара. –2006. – Т.8. – №4. – С. 911-914.

19. **Галкин, В.В.** Механические свойства стального рессорного листа после прокатки на клин / В.В. Галкин, Г.В. Пачурин, О.С. Кошелев // Упрочняющие технологии и покрытия. –2006. – №3. – С. 3-9.

20. **Галкин, В.В.** Оценка технологичности высадки стержневых крепежных изделий с наружным волнистым профилем головки типа «TORX»/ В.В. Галкин, О.С. Кошелев, Е.Н. Хохлов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №7. – С. 30-32.

21. **Галкин В.В.** Качество рессорного листа из стали 50ХГФА, прокатанного на клин / В.В. Галкин и [др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №11. – С.38-43.

22. **Галкин В.В.** Исследование неравномерности деформации в заготовке прямоугольного сечения, прокатанной на клин / В.В. Галкин и [др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – № 1. – С. 30-34.

23. **Галкин, В.В.** Циклическая долговечность листовых деталей из титановых сплавов BT20 и ОТ4-1 / В.В. Галкин, О.С. Кошелев, А.С. Белкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №3. – С. 26-29.

24. **Галкин, В.В.** Изготовление чугуновых поковок круглой формы методом горячей объемной штамповки в открытом штампе на кривошипном горячештамповочном прессе / В.В. Галкин, В.Н. Дубинский, В.А. Коровин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №2. – С. 31-33.

25. **Галкин, В.В.** Структурно-деформационная оценка упрочнения металла в многооперационных процессах холодного деформирования // В.В.Галкин. Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №8. – С. 8-12.

26. **Галкин, В.В.** Деформация материала в головке болтов при холодной высадки / В.В. Галкин, О.С. Кошелев, Е.Г. Терещенко, Е.Н. Хохлов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – №1. – С. 24-27.

27. **Галкин, В.В.** Развитие микроструктурного метода исследования конечных пластических деформаций / В.В. Галкин, С.А. Кудрявцев, Е.Г. Терещенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – №2. – С. 22-24.

28. **Галкин, В.В.** К развитию вопроса о построении диаграмм рекристаллизации металла / В.В. Галкин, А.А. Дербенев, Е.Г. Терещенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №3. – С. 43-46.
29. **Галкин, В.В.** Методика расчета конечных пластических деформаций металлоизделий, изготовленных много переходными процессами холодной объемной штамповки / Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №9. – С. 23-27.
30. **Галкин, В.В.** Строение очага деформации в полосе прямоугольного сечения, раскатываемой на клин по плите / В.В. Галкин и [др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №11. – С. 24-31.
31. **Галкин, В.В.** К вопросу построения экспериментальных зависимостей интенсивности напряжений металла от степени деформации / Галкин В.В., Кудрявцев С.А., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013.– №11. – С.23-27.
32. Пачурин В.Г. Оценка деформационной неоднородности в раскатанных изделиях с клиновым профилем / В.Г. Пачурин, **В.В. Галкин**, Г.В. Пачурин // Фундаментальные исследования. – 2014. – №11 (Ч. 4). – С.765-773.
33. **Галкин, В.В.** Структурно-механические и усталостные свойства штампованных на молоте и прессе листовых гофрированных панелей из сплава ЭИ 878 / В.В. Галкин, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // Фундаментальные исследования. –2013. –№10 (часть 15). – С. 3294-3298.
34. **Галкин, В.В.** Эксплуатационная долговечность листовых гофрированных заготовок из некоторых титановых сплавов / В.В. Галкин, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // Фундаментальные исследования. – 2014. – №12 (часть 3). – С. 14-19.
35. **Галкин, В.В.** Изготовление толстолистовой защитной оболочки защитного шлема из высокопрочных алюминиевого и титанового сплавов методом горячей вытяжки / В.В.Галкин и [др.] // Заготовительные производства в машиностроении. –2012. –№ 9. – С.33-36.
36. **Галкин, В.В.** Математическое моделирование процесса изготовления изделия типа стакан методом глубокой вытяжки на основе применения программного комплекса DEFORM / В.В. Галкин, А.А. Поздышев, Г.В. Пачурин, А.А. Вашурин // Фундаментальные исследования. – 2013. –№1 (часть 2). – С.371-374.
37. **Галкин, В.В.** Предельная степень вытяжки листовых изделий со сферическим дном в условиях гор ячей деформации / В.В. Галкин, А.Б. Калинин, Г.В. Пачурин, Д.Ю. Ермаков // Фундаментальные исследования. – 2014. – №5 (часть 5). – С.939-944.
38. **Галкин, В.В.** Исследование структуры и повреждаемости листового титанового сплава ОТ4-1 в условиях вязкого разрушения и жестких схем напряженного состояния // В.В. Галкин. Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – №12. – С.6-12.
39. **Галкин, В.В.** Исследование поврежденности стали 20 в условиях многоэтапной холодной объемной обработки / В.В. Галкин, А.А. Дербенев, Г.В. Пачурин, Ю.В. Бугров // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – №5 (часть 2). – С. 225-231.
40. **Галкин, В.В.** Исследование развития рекристаллизации нержавеющей стали 12Х18Н10Т в условиях многопереходной горячей пластической обработки / В.В. Галкин, А.А. Дербенев, О.С. Кошелев, Е.Г. Терещенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – №4. – С. 6-12.
41. **Галкин, В.В.** К вопросу низкой стойкости пуансонов при выдавливании крестообразного шлица в винтах с потайной головкой из стали 14Х17Н2/ В.В. Галкин, А.В. Братухин. Г.Н. Гаврилов, С.В. Иванов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – № 11. – С. 17-22.
42. **Галкин, В.В.** Применение программного обеспечения для определения механических свойств металлических материалов в условиях многопереходного деформирования / В.В. Галкин, С.А. Манцеров, Л.О. Дудников, Н.А. Огурцов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2021. – Т.19, – № 11. – С. 400-407.

Публикации в прочих изданиях

43. **Галкин, В.В.** Поведение текстурированных сплавов титана в технологии теплой и горячей обработки / В.В. Галкин, В.А. Скуднов, М.А.Золотов // *Текстуры и рекристаллизация в металлах и сплавах: Тезисы докл. Пятой всесоюзн. конф.* – Уфа, 1987. – С.62.
44. **Галкин В.В.,** Золотов М.А., Скуднов В.А. Способ и устройство для испытания листовых образцов на двухосное растяжение / В.В. Галкин, М.А. Золотов, В.А. Скуднов // *Научно-технические достижения.* – 1989. – №6. – С. 56-57.
45. **Галкин, В.В.** Глубокая вытяжка деталей с дифференцированным нагревом заготовок / В.В. Галкин, В.А. Скуднов, М.А.Золотов // *Сверхпластичность металлов: Тезисы докл. Четвертой всесоюзн. конф.* – Уфа, 1989. – С.16.
46. **Галкин, В.В.** Исследование деформируемости титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С при двухосном растяжении в условиях «теплой» и «горячей» деформации / В.В. Галкин, В.А. Скуднов, М.А. Золотов, Т.И. Позднякова // *Сб. межвуз. труд.–Свердловск.–1989.–№3.* –С.14-18.
47. **Галкин, В.В.** Изучение повреждаемости и разработка оптимальных технологий термомеханической обработки титановых сплавов ОТ4-1 и ВТ6С при производстве деталей летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / **Галкин Владимир Викторович.** – Горький, 1989. – 146 с.
48. **Галкин, В.В.** Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM / В.В. Галкин, А.А. Халамов, П.В. Уланов, А.А. Латаев // *САПР и графика.* – 2005. – №5. – С. 40-42.
49. **Галкин, В.В.** Вопросы моделирования процесса клиновой раскатки применением программного комплекса DEFORM / В.В. Галкин, П.В. Уланов, А.А. Латаев // *Прикладные исследования в механике / Труды III науч. конф. «Инженерные системы – 2005».* ООО «ТЕСИС». – М.: МФТИ, 2006. – С.194-203
50. **Галкин, В.В.** Закономерности структурно-механических изменений в раскатанной на клин стали 50ХГФА/ В.В. Галкин, В.Г. Пачурин, О.В. Власов, Е.Г. Терещенко // *Технология металлов.* – 2013. – №6. – С. 17-28.
51. **Галкин, В.В.** К вопросу микроструктурной оценки распределения пластических деформаций металла холодно-высаженных крепежных изделий / В.В.Галкин. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – №8. – С.11-14.
52. **Galkin, V.V.,** Pachurin V.G., Pachurin G. V., Derbenev A.A. Of the structural and mechanical properties of the metal in a product with wedge profile, receive operation rolling // *Modern scientific research and their practical application /* под редакцией Г. Александра Шибаева, Александра Д. Markova. Vol J11307. May 2013. p. 386-392. (Куприенко С.В., Одесса, 2013 год) – URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/J11307.pdf> (дата: 04.07.13).
53. Pachurin V.G., **Galkin, V.V.,** Pachurin G. V. Fatigue resistance stamped on the grind and press shell plate alloy ЭИ 878 // *Modern scientific research and their practical application, edited by Alexandr G. Shibaev, Alexandra D. Markova.* Vol.J11410-020. P. 110-114. (Kupriyenko SV, Odessa, 2014) – URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j11410.pdf> (date: 01.06.2014).
54. Пачурин И.Г., **Галкин В.В.,** Пачурин Г.В. Эффект влияния структурного состояния на долговечность деформированных материалов // *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: Материалы VI Международной конф.* – Москва: ИМЕТРАН, 13.11.2015. –С.62.
55. **Галкин В.В.,** Поздышев А.И., Поздышев В.А., Вашурин А.А. К вопросу определения предельной степени вытяжки изделий из титановых сплавов // *Сб.: «Стратегические вопросы мировой науки».* – 2014. – Т.34. – С. 31-36.
56. Галкин, В.В. Структурно-деформированное состояние раскатанной на клин рессорной стали / В.В. Галкин, О.В. Власов, Г.В. Пачурин // *Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано до микро уровня: мат. 13 международ. науч.-практ. конф. часть 1 / Политехн. ун-т.* – СПб. 2011 г. – С. 323-330.
57. **Галкин, В.В.** Взаимосвязь усталостных свойств горячедеформированных среднелегированных сталей со структурно-механическими характеристиками / В.В. Галкин,

- В.Г. Пачурин // Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества: Тезисы докл. VI Межд. конф. с элементами научной школы для молодежи. – Суздаль, 3-7 октября 2016. – С. 62.
58. **Галкин, В.В.** Исследование деформационного и структурно-механического состояния стали 16ХСН в процессе высадки винтов с потайной головкой и крестообразным шлицем / В.В. Галкин, А.А. Дербенев, А.В. Братухин, Г.Н. Гаврилов // Вопросы электротехнологии. СГТУ–Саратов, 2019. – №1(22). – С. 95-103.
59. **Галкин, В.В.** Деформационный анализ и оценка упрочнения стали 12Х17Г9АН4 при изготовлении листовых панелей с синусоидальным рифтом на молоте в жестком штампе и прессе с применением эластичной среды / В.В. Галкин, Г.В. Пачурин, Е.А. Баженов // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России: Сборник научных трудов VI Междунар. научно-произв. конф. / УлГТУ – Ульяновск, 2021 г. – С. 122-131.

Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства на базы данных и программы для ЭВМ

60. Золотов М.А., **Галкин В.В.**, Скуднов В.А., Ольман Г.В. Устройство для испытания образцов на двухосное растяжение. А.с. 1194141, МКИ³ G 01N 3/10 от 22.07.1985 г., заявка № 3718886 от 28.03.1984г.
61. Золотов М.А., **Галкин В.В.**, Скуднов В.А. Устройство для испытания образцов на двухосное растяжение. А.с. 1299264, МКИ³ G 01N 3/08 от 22.11.1986 г., заявка № 3765724 от 28.06.1984 г.
62. Золотов М.А., **Галкин В.В.**, Шевченко М.П., Гребнев В.В., Цуканов А.А. Штамп для вытяжки с нагревом. А.с. № 1517213, МКИ³ кл. G 01N 3/10, B 21 D 22/20 от 22.06.1989 г. заявка № 4385169 от 19.01.1988г.
63. **Галкин В.В.**, Золотов М.А., Перевезенцев В.Н., Ларин С.А. Способ изготовления панели. А.с. № 1814234, МКИ³ кл. B 21 D 26/02 от 11.10.1992 г. заявка № 49002899 от 08.01.1991 г.
64. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613502. Заявка № 2014610743 от 04.02.14 г. Зарегистрировано 27.03.14 г. Определение величины зерна для количественной оценки холоднодеформированного состояния сталей и сплавов / Манцеров С.А., **Галкин В.В.**, Вилков Н.Н., Терещенко Е.Г, Дербенев А.А., Кошелев А.А.
65. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611190. Заявка № 2014662663 от 09.12.14 г. Зарегистрировано 26.01.15 г. Определение величины зерна для оценки рекристаллизации горячедеформированных сталей и сплавов / Манцеров С.А., **Галкин В.В.**, Хадеев Р.Г., Терещенко Е.Г, Дербенев А.А., Пачурин В.Г.
66. Пачурин, В.Г. Способ прогнозирования циклической долговечности металлов / В.Г. Пачурин, **В.В. Галкин**, А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Патент RU 2 619 480 С1, МПКG 01N 3/32 (2006.01), заявка № 2016117949 от 10.05.2016 г, зарегистрировано 16.05.17 г.
67. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614913. Заявка № 2021613777 от 24.03.21 г. Зарегистрировано 31.03.21 г. Программное обеспечение анализа структурно-механических характеристик металлических материалов при многоэтапном пластическом деформировании / Манцеров С.А., Дудников Д.О., Огурцов Н.А., **Галкин В.В.**, Гаврилов Г.Н.
68. **Галкин В.В.** Устройство для испытания сварных листовых образцов на двухосное растяжение / **В.В. Галкин**, Г.Н. Гаврилов, П.Л. Жилин // Евразийский патент № 040659, заявка № 202100064 от 29.12.2020 г, патент выдан 12.07.22 г.

Подписано в печать _____ Формат 60x48 1/17. Бумага офсетная
Печать офсетная. Уч.-Изд.Л.1,5. Тираж: _____. Заказ _____.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Типография НГТУ. 603155, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.