

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Морозов Андрей Павлович

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ И КИНЕТИКА МИКРОТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛА В
ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ В
УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. ф.-м. н., проф.
Радченко Владимир Павлович

Самара – 2017

Оглавление

Введение	5
1. Аналитический обзор и постановка задачи	15
Выводы по разделу 1	37
2. Экспериментальное исследование стохастических полей реологических деформаций и физико-механических параметров поверхностного слоя цилиндрических и плоских образцов	40
2.1. Экспериментальное исследование стохастических полей реологических деформаций, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1	40
2.1.1. Постановка задачи	40
2.1.2. Методика проведения экспериментальных исследований одноосного распределения неупругой деформации в цилиндрических образцах из сплава АД1	43
2.1.3. Результаты испытаний, их стохастический и корреляционный анализ	49
2.2. Исследование стохастических полей реологических деформаций плоских образцов из сплава АД1	63
2.3. Экспериментальное исследование стохастических полей деформаций ползучести в полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	68
2.4. Выводы по разделу 2	84
3. Стохастическая математическая модель ползучести сплава Д16Т при $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	85
3.1. Выбор одноосной стохастической модели и методика идентификации ее случайных величин	85

3.2. Обобщение одноосной модели на сложное напряженное состояние	100
3.3. Выводы по разделу 3	101
4. Решение стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочнённого полого цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях растяжения при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$	102
4.1. Постановка задачи	102
4.2. Метод решения детерминированной краевой задачи ползучести упрочненного полого цилиндрического образца	103
4.3. Численный метод решения стохастической краевой задачи ползучести упрочненного полого цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения. Анализ решения	111
4.4. Выводы по разделу 4	127
5. Исследования влияния температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику микроструктуры и физико-механических параметров упрочнённых плоских и цилиндрических образцов	129
5.1. Постановка задачи	129
5.2. Исследование влияния механической обработки, поверхностно пластического упрочнения и многоциклового нагружения на физико-механические характеристики плоских образцов из сплава ЭИ698ВД	130
5.3. Исследование поверхностного пластического упрочнения, температурных выдержек и многоциклового нагружения на микротвердость, шероховатость и микроструктуру материала полых цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т	151
5.4. Исследование влияния поверхностного упрочнения и многоциклового нагружения на микротвердость цилиндрических деталей с галтелью	171

5.5. Выводы по разделу 5	178
Заключение	179
Список использованных источников и литературы	182
Приложение А	207
Приложение Б	208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Основными задачами современного машиностроения, в том числе автомобилестроения и авиадвигателестроения, является повышение срока службы и надежности изделий с одновременным снижением (или хотя бы не увеличением) их массы. Конструктивные методы повышения прочности при переменных нагрузках приводят, как правило, к увеличению массы конструкций и числа комплектующих, усложнению технологии изготовления, ухудшают унификацию и стандартизацию конечных изделий.

Одним из основных резервов повышения сопротивления усталости деталей, в том числе с концентраторами напряжений, является применение современных поверхностно упрочняющих технологий, при этом практически не происходит изменений ни геометрических параметров детали, ни ее массы [150, 6 и другие]. Увеличение предела сопротивления усталости после поверхностного пластического деформирования детали связано с изменением физико-механического состояния поверхностного слоя и наличием в нем сжимающих остаточных напряжений [9, 15, 20, 21, 22, 33, 36, 41, 42, 80, 82, 85 и другие].

Однако при эксплуатации в условиях высокотемпературной ползучести наблюдается релаксация наведенных остаточных напряжений. Поэтому требуется разработка методов решения краевых задач ползучести поверхностно упрочненных элементов конструкций для решения проблемы устойчивости наведенных остаточных напряжений к температурно-силовым нагрузкам. Особенно остро эта задача стоит в авиадвигателестроении, нефтехимической и атомной промышленности, машиностроении, при этом в этих промышленных комплексах широкое применение имеют алюминиевые сплавы АД1, Д16Т, В95, жаропрочный сплав ЭИ698ВД и стали (сталь 20 и другие).

Хорошо известно, что даже при испытаниях в лабораторных условиях деформации пластичности и ползучести при повышенных температурах имеют существенный разброс. В таких условиях обычные детерминированные реологические уравнения оказываются плохо приспособленными к целям прогнози-

рования поведения реальных конструкций. В лучшем случае они позволяют предсказать поведение материала в «среднем», что, однако, не может решить всех проблем, связанных с оценкой ресурса изделий, и приводит к необоснованно высоким запасам прочности, увеличению материалоемкости изделий, существенному их удорожанию.

Изложенное свидетельствует о необходимости применения вероятностно-статистических методов при исследовании процессов неупругого реологического деформирования и разрушения материалов, построении соответствующих определяющих соотношений и решении краевых задач на их основе.

Прямые экспериментальные и теоретические исследования [6, 33, 42, 80, 83, 150 и другие] устанавливают связь между поверхностным пластическим деформированием и увеличением характеристик многоциклового усталости. При этом отмечается, что поле напряжений, сформированное упрочняющей обработкой, создает своего рода барьер движению дислокаций к поверхности. Этот механизм поверхностной блокировки содействует повышению многоциклового прочности. Таким образом, при упрочнении проявляется благоприятное влияние двух факторов: с одной стороны, сжимающих остаточных напряжений, а с другой – появления в поверхностном слое особой структуры металла за счет динамики упрочнения. Поэтому исследование эффективности упрочнения должно развиваться не только в направлении изучения влияния остаточных напряжений, например, на повышение сопротивления усталости, но и в направлении изучения физико-механических характеристик материала упрочненного слоя. В этом плане исследование, например, шероховатости поверхности, ее микротвердости, степени и глубины деформированного упрочнения, величины остаточных напряжений и многих физических параметров, связанных с искажением кристаллической решетки, изменением формы и размера зерен, плотностью дислокаций является весьма актуальной задачей.

С другой стороны, математические модели для оценки сопротивления усталости и релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести требу-

ют знания полной картины распределения компонент тензора остаточных напряжений, поскольку в соответствующие критерии и уравнения состояния входят эквивалентные напряжения, распределенные по глубине упрочненного слоя. Отсюда возникает задача решения соответствующих краевых задач поверхностного пластического упрочнения. И если в детерминированной постановке эти задачи находятся в стадии разработки и частичного решения, то в стохастической постановке такого рода задачи вообще не рассматривались.

Вышеизложенное определяет актуальность исследований и позволяет сформировать цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Целью работы является разработка стохастических математических моделей ползучести поверхностно упрочненных цилиндрических элементов конструкций; комплексный анализ и систематизация результатов исследований по влиянию режимов пневмодробеструйной обработки, температурно-силовых нагрузок в условиях ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику остаточных напряжений и характеристики микроструктурного состояния материала поверхностного слоя упрочненных деталей в вероятностно-статистической постановке.

Для реализации поставленной цели в работе поставлены следующие задачи:

1) проведение комплексного анализа стохастических полей реологических деформаций, микротвердости и шероховатости в пределах рабочей части цилиндрических образцов из сплава АД1 для оценки влияния предварительной пластической деформации на последующую ползучесть;

2) проведение экспериментального исследования стохастических полей деформации ползучести по пространственно-временным координатам в полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125$ °С;

3) построение феноменологических стохастических уравнений ползучести в условиях одноосного и сложного напряженных состояний для сплава Д16Т при $T = 125$ °С и их экспериментальная проверка;

4) разработка методики идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющей сократить объем определяющих экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней величины;

5) разработка метода численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий и его реализация для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения;

6) исследование релаксации остаточных напряжений и получение статистических оценок для полей остаточных напряжений в процессе ползучести полого цилиндра из сплава Д16Т в различные временные сечения;

7) проведение комплексного анализа влияния режимов поверхностного пластического упрочнения гидро- и пневмодробеструйной обработкой, ползучести в условиях термоэкспозиции, многоциклового нагружения на формирование и кинетику остаточных напряжений, микротвердость и шероховатость, микроструктуру материала в поверхностно упрочненных плоских и цилиндрических образцах.

Научная новизна исследований, проведенных в данной диссертационной работе, заключается в следующем:

1) выполнен комплексный анализ результатов экспериментальных исследований стохастических полей реологических деформаций, микроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, на основании которого установлено, что развитие деформации пластичности и ползучести идет независимо для каждой из этих компонент; это позволяет не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических образцов;

2) впервые экспериментально исследовано распределение локальной деформации ползучести по пространственно-временным координатам в пределах одного поверхностно упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125$ °С и установлено, что в пределах одного образца разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней может достигать 150-200%;

3) предложены феноменологические стохастические уравнения ползучести для сплава Д16Т при $T = 125$ °С в условиях одноосного и сложного напряженного состояния; разработана новая методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая существенно сократить объем экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней (среднеинтегральной) величины;

4) разработана методика численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий, реализованная для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения при температуре $T = 125$ °С, на основании которой исследована релаксация остаточных напряжений и впервые получены статистические оценки для полей остаточных напряжений в процессе ползучести в различные временные сечения;

5) выполнены новые исследования влияния режимов упрочнения, температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику микроструктуры и физико-механических параметров упрочнённых плоских и цилиндрических образцов из сплавов В95, Д16Т, ЭИ698ВД и стали 20, позволившие установить повышение значений микротвердости для всех типов упрочненных образцов по сравнению с неупрочненными, при этом распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа крайне неоднородное: в упрочненной (периферийной) зоне значения микротвердости существенно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах;

б) установлено, что многоцикловые испытания на усталость и ползучесть в условиях термоэкспозиции приводят к уменьшению значений микротвердости в упрочненных образцах вплоть до исходного состояния для неупрочненных образцов, что в основном связано с релаксацией наведенных в процессе упрочнения остаточных напряжений.

Практическая значимость работы заключается в экспериментальном обосновании и разработке стохастических моделей ползучести материалов, создание на этой основе численного метода решения стохастических краевых задач ползучести поверхностно упрочненных цилиндрических изделий для получения статистических оценок полей остаточных напряжений в различные временные сечения. Такая информация является основой для создания методик прогнозирования ресурса упрочненных элементов конструкций по параметрическому критерию отказа – величине остаточных напряжений. С прикладной точки зрения, полученные экспериментальные и теоретические результаты позволяют научно обоснованно оценивать устойчивость наведенных при упрочнении остаточных напряжений в упрочненных деталях к температурно-силовым воздействиям в условиях ползучести. Полученные новые экспериментальные данные дополняют соответствующую информационную базу данных и востребованы в инженерной практике.

Положения, выносимые на защиту:

1) феноменологическая стохастическая модель ползучести для сплава Д16Т при $T = 125$ °С в условиях одноосного и сложного напряженного состояния и результаты проверки ее адекватности экспериментальным данным;

2) методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая сократить объем определяющих экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней величины;

3) выводы из комплексного анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований стохастических полей деформации ползучести и пластичности, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, на основании которого обоснованно сформулирована гипотеза аддитивности стохастических полей распределения деформаций пластичности и ползучести, что позволяет не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических элементов конструкций;

4) метод численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненного полого цилиндра при осевом растяжении и результаты его применения для статистических оценок полей остаточных напряжений в образцах из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в различные временные сечения;

5) результаты экспериментальных и теоретических исследований по влиянию режимов упрочнения, температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику остаточных напряжений, микроструктуру материала в упрочненной зоне и микротвердость в плоских и цилиндрических образцах из сплавов В95, Д16Т, ЭИ698ВД, позволивших установить, что увеличение микротвердости в упрочненных образцах по сравнению с неупрочненными связано в основном с наличием остаточных напряжений в упрочненном слое, а ее уменьшение после термоэкспозиции до значений в неупрочненных образцах – с релаксацией остаточных напряжений вследствие ползучести материала.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований подтверждается корректностью использования математического аппарата, законов механики деформируемого твердого тела; апробируемостью используемых численных и экспериментальных методов для определения полей остаточных напряжений, микроструктуры материала, микротвердости и шероховатости упрочненных образцов; адекватностью имеющихся модельных пред-

ставлений физической картины исследуемых процессов; удовлетворительным совпадением результатов расчетов по предложенным стохастическим моделям с экспериментальными данными.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и списка источников из 181 наименования. Работа содержит 206 страницы основного текста, 98 рисунков, 21 таблицы и 2 приложения.

Апробация работы. Результаты научных исследований опубликованы в 56 печатных работах и были представлены на Пятом Международном форуме молодых ученых «Актуальных проблемы современной науки» (Самара, 2010 г.); Международных молодежных научных конференциях по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2010, 2011 гг.); VI, VII Всероссийских конференциях «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010, 2012 гг.); VII, VIII, IX, X Всероссийских научных конференциях с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2010, 2011, 2013, 2016 гг.); III Международной научно-практической конференции «Новые технологии и инновационные разработки» (Тамбов, 2010 г.); VI, VII международной научно-практической конференции «Wyksztacenie i nauka bez granic» (Пшемьсль, Польша, 2010, 2011 гг.); V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011 г.); VI Всероссийской молодежной научной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (Тольятти, 2011 г.); VII, VIII Международной научно-практической конференции «Vedecku prumysl Evropskeho kontinentu» (Прага, Чехия, 2011, 2012 гг.); XXI Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2012 г.); V Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Студенчество в науке – инновационный потенциал будущего» (Набережные Челны, 2012 г.); XVIII, XIX Международных конференций «Физика прочности и пластичности материалов» (Самара,

2012, 2015 гг.); симпозиуме с международным участием «Самолетостроение России. Проблемы и перспективы» (Самара, 2012 г.); Международном научно-техническом форуме, посвященном 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ (Самара, 2012 г.); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2012 г.); I Международной научно-практической конференции «Студенчество в науке – инновационный потенциал будущего» (Набережные Челны, 2013); Международной научно-технической конференции «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций» (Киев, 2013 г.); Всероссийской молодежной научной конференции «Современное техническое образование и транспортный комплекс России: состояние, проблемы и перспективы развития» (Уфа, 2013 г.); III Международной научно-технической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2013 г.); Международной молодежной научной конференции «XII Королевские чтения» (Самара, 2013 г.); VI Международной школе с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2013 г.); IX международной научно-практической конференции «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami» (Пшемысль, Польша, 2013 г.); IX международной научно-практической конференции «Achievement of high school» (София, Болгария, 2013 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации» (Грозный, 2013 г.); VIII Российской научно-технической конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2014 г.); Пятой международной научно-практической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении» (Киев, 2014 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» (Ульяновск, 2014 г.); Международном научно-техническом сборнике «Надежность и долговечность машин и сооружений» (Киев, Украина, 2015 г.); Материалы международной научно-практической конференции «Современное научное знание: теория, методология, практика»

(Смоленск, 2015 г.); а также на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. – профессор Радченко В.П. 2012-2016 гг.)

Работа проводилась в рамках проектов 2.1.1/3397, 2.1.1/13944, 1.312/2011, Государственного контракта №П818, выполняемых при поддержке и финансировании Министерстве образования и науки Российской Федерации, а также в рамках проектов РФФИ № 13-01-00699, 16-01-00249.

Внедрение. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ «СамГТУ» и включены в лекционный материал курсов «Математические основы механики поверхностного пластического упрочения», «Численные методы решения краевых задач механики деформируемого твердого тела» и «Реологические модели» основной образовательной программы подготовки аспирантов и бакалавров, а также в расчетную практику профильных отделов ОАО «Кузнецов» (г. Самара).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 57 печатных работах, из них 1 статья в журнале из базы Scopus, 6 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 24 статьи в сборниках трудов конференций и 26 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Работы [55-72] выполнены самостоятельно, в основных работах [106, 108, 112, 118, 119, 120] диссертанту принадлежит совместная постановка задач, совместное проведение экспериментальных исследований, анализ и систематизация результатов, проведение расчетов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежит как постановка задач, так и результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук профессору В.П. Радченко за постановку задачи и поддержку работы, а также доктору технических наук профессору В.Ф. Павлову за консультации по экспериментальной части исследования и постоянное внимание к работе.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из возможных путей повышения ресурса деталей является использование технологий поверхностного пластического упрочнения, поскольку поверхность детали наиболее интенсивно подвергается температурно-силовым нагрузкам, влиянию агрессивных сред и т.д. В частности, теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что поверхностное пластическое упрочнение повышает предел сопротивления усталости, сопротивление детали трению, статическую прочность в условиях хрупкого разрушения. Положительное влияние поверхностного упрочнения связывают с наличием сжимающих остаточных напряжений в тонком упрочненном слое, которые компенсируют несовместные пластические деформации в приповерхностном слое, возникающие после различных видов механической, термической, химической обработки поверхности детали.

Классификацию остаточных напряжений можно найти в работах [75, 85, 125]. Остаточные напряжения в металлах существуют на всех иерархических уровнях: от субмикроскопических напряжений на молекулярно-атомном уровне до макронапряжений при принятии гипотезы механики сплошной среды, т.е. макронапряжений, уравновешенных в макрообъемах деталей. В дальнейшем в данной диссертационной работе будут рассматриваться именно макронапряжения.

Наиболее интенсивно и обстоятельно в научной литературе исследована проблема влияния сжимающих остаточных напряжений на характеристики малоциклового и многоциклового усталости [6, 9, 15-19, 22, 32, 33, 41, 42, 53, 80-83, 11, 12, 13]. В указанных работах отмечается, что в зависимости от технологии упрочнения предел сопротивления усталости повышается в среднем на 30-70%.

Несмотря на почти вековую историю разработки теории влияния остаточных напряжений на характеристики усталости и прочности упрочненных

элементов конструкций, и в настоящее время в стадии разработки находится ряд проблем. Рассмотрим некоторые из них.

Для решения краевых задач механики упрочненных конструкций ключевым вопросом является построение физических определяющих уравнений, связывающих тензоры напряжений и деформаций, а также время, в условиях реологического деформирования. В подавляющем числе научных работ используются детерминированные феноменологические теории ползучести, которые игнорируют реально действующий разброс экспериментальных данных для деформации ползучести, обусловленной структурной неоднородностью твердых тел. Так, в экспериментальных работах [3-5, 10, 39, 79, 94, 95, 99, 102, 132, 136, 138, 141, 27, 86 и других] установлено, что для партии образцов даже из одной плавки при строго калиброванных нагрузках наблюдаемый разброс для деформации ползучести и времени до разрушения может достигать 20-50%, и, как отмечено Ю.Н. Работновым [93, 94, 95], такие результаты следует признать приемлемыми.

Исторически первые попытки учесть неоднородность деформации были предприняты в теории упругости в работах Волкова С.Д. [25, 26], Ломакина В.А. [51, 52], Вайнштейна А.А. и Алехина В.Н. [14], в теории композитных материалов [21, 155 и многие другие]. При исследовании разброса данных при ползучести многие авторы не только обнаружили его в партиях однотипных образцов, но и установили, что процесс ползучести протекает крайне неоднородно в пределах одного и того же образца. Так, в монографии Одингга И.А. с соавторами [79] приводятся результаты испытаний по исследованию распределения полей деформаций ползучести в условиях изотермического нагружения по пространственной переменной при двух видах напряженного состояния: одноосное растяжение образцов, растяжение + кручение. Аналогичные исследования на плоских образцах выполнены в работах А.М. Рекова, А.А. Вайнштейна и В.Т. Корниенко [135], а также А.А. Вайнштейна и В.Н. Алехина [14]. Н. Broberg [162] исследовал поле скоростей по пространственной координате об-

разца. В работе В.П. Радченко с соавторами [99] и в диссертации С.А. Дудкина [30] приведены экспериментальные данные одномерных стохастических полей деформаций пластичности и ползучести образцов из сплава АД1 при нормальной (комнатной) температуре, где установлено, что в пределах одного образца реологические деформации локальных участков могут отличаться в несколько раз. Выполненный в [99] анализ позволил сделать вывод о некоррелированности векторов распределений деформаций пластичности и ползучести в пределах одного образца в различные временные сечения и при различных уровнях напряжений.

В связи с вышеизложенным детерминированные методы расчета напряженно-деформированного состояния являются лишь первым и недостаточным приближением, и более корректно применять стохастические методы оценки характеристик длительной прочности, пластичности и ползучести. Особую важность стохастические модели принимают при оценке надежности элементов конструкций по параметрическим критериям отказа. Основные теоретические положения в этом направлении изложены в монографии В.В. Болотина [8].

Недостатком детерминированных теорий ползучести является то, что они имеют дело с механическими характеристиками, осредненными по однотипным элементам конструкций. Иначе говоря, детерминированные модели описывают поведение некоторой «осредненной конструкции», игнорируя при этом значительный разброс данных опытных испытаний. Таким образом, при детерминированном подходе происходит подмена параметров, зависящих от конкретных свойств материала в различных местах детали, параметрами, которые усреднены по всему конструктивному элементу (или даже по нескольким подобным элементам).

При решении задачи долговечности конкретных изделий, когда критерием отказа является локальная деформация заранее заданной величины, знание поведения осредненной конструкции недостаточно, так как время выхода из строя различных элементов конструкции может сильно отличаться от среднего

срока службы. Локальный характер деформации ползучести следует учитывать также при анализе надежности по критерию разрушения, поскольку один и тот же участок в процессе деформации ползучести в одном случае может стать источником концентрации напряжений, а в другом – наоборот, может эту концентрацию напряжений снизить. В связи с этим при оценке надежности конструкции нельзя игнорировать разброс экспериментальных данных. Строить и применять стохастические модели пластичности и ползучести к решению соответствующих краевых задач стоит с учетом характеристик этого разброса.

В процессе построения данных стохастических моделей требуется учитывать существенное различие структуры полей макро- и микронеоднородностей механических характеристик материала. В работе Ю.П. Самарина [138] было установлено, что микронеоднородности оказывают существенное влияние, прежде всего на долговечность материала по критериям типа допустимых перемещений (деформаций), тогда как микронеоднородности – на отказы по критерию разрушения.

Рассмотрим существующие подходы построения стохастических моделей неупругого деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций.

При построении стохастических моделей ползучести и длительной прочности на макроуровне используются соответствующие детерминированные модели, часть параметров и функций в которых полагаются случайными. Для выбора случайных параметров необходимо предварительное исследование экспериментальных данных по кривым ползучести, построенным при постоянных напряжениях. Случайные величины выбирают таким образом, чтобы с помощью их вариации возможно было бы описать любую экспериментальную реализацию (в пределах заданной погрешности).

Идея обобщения детерминированных уравнений на стохастические заменой в них части детерминированных параметров на случайные впервые была выдвинута Ю.П. Самариным в работах [136, 137], а затем в публикации Ильина

В.Н., Кашелкина В.В., Шестерикова С.А. [34] развивалась аналогичная точка зрения.

В настоящее время существует большое количество детерминированных феноменологических теорий неупругого реологического деформирования и длительной прочности. Для детерминированных условий нагружения в этой области стоит указать на работы В.И. Астафьева [2], Ю.И. Кадашевича и В.В. Новожилова [78], А.Ф. Никитенко [77], С.А. Шестерикова и А.М. Локощенко [50], Ю.Н. Работнова [95], Ю.Н. Радаева [174], В.П. Радченко [96, 97, 100], Ю.П. Самарина и Я.М. Клебанова [140], О.В. Соснина [149], J.A. Betten [160], J.T. Boyle и J. Spence [161] и многих других авторов. Здесь можно отметить, что с современным состоянием в теории ползучести металлов можно ознакомиться в монографии Локощенко А. М. [49].

В частных случаях построения стохастических моделей без учета третьей стадии ползучести, например, при построении теории установившейся ползучести в виде

$$\dot{\epsilon} = b s^n \quad (1.1)$$

Н. Broberg и R. Westlund [162, 163] определили, что показатель установившейся ползучести n можно считать детерминированной величиной, а β – случайной. В работе [10] при описании стадии неустановившейся ползучести на основе стохастической теории упрочнения при постоянном напряжении получено

$$\epsilon = \left(\frac{b}{m} \right)^m s^{nm} t^m, \quad (1.2)$$

при этом рассеиванием величин m и n можно пренебречь. От уровня вероятности зависит лишь одна величина β .

Первую и вторую стадии ползучести при постоянном напряжении Ю.П. Самарин [136, 137, 141] предложил описывать следующим образом:

$$\epsilon_0(t) = A_0 + \sum_{i=1}^s A_i (1 - e^{-l_i t}) + vt, \quad (1.3)$$

где $e_0(t)$ – полная деформация, λ_i – неслучайная константа; A_0, A_i, v – случайные величины, при этом A_0 задает случайные значения деформации ползучести. Соотношение (1.3) можно получить в частном случае $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$ из стохастической модели Ю.П. Самарина [136, 137, 141], которая в пределах первых двух стадий ползучести имеет вид (без учета упругой деформации):

$$\begin{aligned}
 p &= u + v + w; \\
 \begin{cases} u(t) = \sum_{k=1}^s u_k(t), \\ u_k(t) = I_k [A_k \mathcal{S}^n - u_k(t)]; \end{cases} \\
 \begin{cases} v_k(t) = \sum_{k=1}^s v_k(t), \\ \dot{v}_k(t) = \begin{cases} I_k [B_k \mathcal{S}^n - v_k(t)], & B_k \mathcal{S}^n \geq v_k(t); \\ 0, & B_k \mathcal{S}^n < v_k(t); \end{cases} \end{cases} \\
 \dot{w} = C \mathcal{S}^m,
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

где A_k, B_k, C – случайные параметры; λ_k, m, n, s – детерминированные. В (1.4): p – деформация ползучести; u, v, w – вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие p . Если (1.4) проинтегрировать при $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$, то получим:

$$p(t) = \sum_{k=1}^s (A_k + B_k) (1 - e^{-\lambda_k t}) \sigma_0^n + c \sigma_0^m t, \tag{1.5}$$

что соответствует (1.3) с видоизмененными коэффициентами. Вообще говоря, предположение, что показатели нелинейности n и m являются детерминированными, приводит к стохастически линейной системе дифференциальных уравнений, решение которой при $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$ позволяет легко описать случайный процесс (во времени), т.е. найти аналитически математическое ожидание и дисперсию $p = p(t)$, если известны статистические оценки случайных величин A_k, B_k и C .

Дальнейшее обобщение модели (1.4) было проведено в работах Радченко В.П., Симонова А.В. [131] и Радченко В.П., Симонова А.В., Дудкина С.А. [132]

и диссертации Дудкина С.А. [30], в которых эта модель была обобщена на случай третьей стадии ползучести и учета деформации пластичности.

Обобщение модели типа (1.4) на случай неизотермической ползучести применительно к сплаву ЖС6КП выполнено в работе Радченко В.П., Саушкина М.Н., Голудина Е.П. [129], причем для аппроксимации показателей нелинейности m и n использовались детерминированные линейные зависимости от температуры, а величины A_k , B_k и C аппроксимировались экспоненциальными слагаемыми от температуры, и здесь случайной величиной полагалась предэкспонента. Эти предположения позволили также получить стохастически линейную систему определяющих соотношений.

Одной из актуальных проблем является проблема решения краевых задач и оценки надежности элементов конструкций в условиях ползучести с использованием стохастических реологических моделей деформирования.

Прежде чем рассматривать подходы в стохастической теории ползучести, отметим, что аналогичные задачи в теории упругости разработаны достаточно хорошо, поскольку математических проблем с решением краевых задач не возникает в силу физической и стохастической линейности определяющих уравнений. Не возникает серьезных трудностей и при решении краевых задач теории композитных материалов с упругими фазовыми составляющими, поскольку после осреднения по какому-либо закону задача сводится к стохастической для эффективного, но упругого, материала. Основным препятствием решения стохастических задач ползучести является физическая нелинейность определяющих (физических) уравнений состояния. В этой связи получить аналитические решения можно только в некоторых частных случаях, в которых отсутствует перераспределение напряжений от упругого состояния до текущего момента времени в процессе ползучести. Первым применением стохастических уравнений ползучести к расчету напряженно-деформированного состояния были статически определимые системы, в которых не происходит перераспределения напряжений во времени и они определяются только из уравнений равновесия.

Так, в работах В.А. Кузнецова [43, 44] и В.А. Кузнецова, Ю.П. Самарина [46] рассматривались вопросы применимости стохастических уравнений ползучести (1.4) к оценке надежности единичного стержня при постоянном напряжении и решалась задача отказа этой «конструкции» как по деформационному критерию отказа (деформация достигает заданной критической величины), так и силовому критерию в условиях чистой релаксации (напряжение $\sigma(t)$ достигает заданной критической величины σ_0). В работе Ю.П. Самарина и В.А. Кузнецова [45] рассмотрена уже многоэлементная статически определимая стержневая система и на основании стохастических уравнений ползучести решалась также задача надежности, причем отказ определялся как момент времени, когда перемещение какого-либо узла в некотором направлении достигал критической величины. Дальнейшее развитие работы Самарина Ю.П. и Кузнецова В.А. получили в работах Шершневой М.В. [156] и Попова Н.Н., Павловой Г.А., Шершневой М.В. [91], в которых подходы распространены на случай третьей стадии ползучести.

Другой класс задач, в которых удалось получить аналитические оценки стохастических полей напряжений и реологических деформаций, относятся к краевым задачам установившейся ползучести, в которых не учитывается упругая деформация и рассматривается стационарное асимптотическое поле напряжений при $t \rightarrow \infty$. Задачи, как правило, решаются методом малого параметра (методом возмущений), при этом роль малого параметра играет величина вариации микронеоднородных реологических сред по отношению к детерминированным (осредненным) свойствам этой среды. Однако основной предпосылкой методов такого рода является наличие решения в детерминированной постановке, которое играет роль нулевого приближения. В этом направлении в работах [123] В.П. Радченко и Н.Н. Попова, а также Н.Н. Попова и Л.В. Коваленко [38] получены статистические моменты первого и второго порядка для полей напряжений и скоростей деформации ползучести для плоскости в условиях ее двухосного нагружения и выполнен их анализ в зависимости от степени неод-

нородности и показателя нелинейности в степенной аппроксимации установленной ползучести. Дальнейшее развитие этого класса задач выполнялось в работах Попова Н.Н. с соавторами: в [37] рассмотрена стохастически неоднородная полоса и показано, что на границе области наблюдается концентрация напряжений, чего не наблюдается при решении детерминированной задачи; пространственная задача рассмотрена в [88]; в [87, 92] приводится решение стохастической краевой задачи для толстостенной трубы под действием внутреннего давления, неоднородность свойств в которой задается по радиусу трубы; в [91] предложена методика расчета надежности осесимметричных стохастических элементов конструкций в условиях ползучести по теории выбросов. В работе В.П. Радченко и Н.Н. Попова [122] в предположении о независимости влияния процессов реологического деформирования и накопления поврежденности решена стохастическая краевая задача для плоскости с учетом третьей стадии ползучести.

В работе [104] на основании обобщенных моделей конструкций, в которых формируются связи типа «крутящий момент – угол закручивания», «внутреннее давление – осевое перемещение трубы» и т.п., разработана обобщенная стохастическая модель элементов конструкции (типа (1.4) с заменой напряжения на обобщенную нагрузку и деформации – на обобщенное перемещение), на основании которой решен ряд стохастических задач для конкретных элементов конструкции (изгиб балки, стержневые системы, толстостенная труба) при учете не только упругой деформации, но и деформации ползучести на всех трех стадиях.

Можно отметить также работу [35], в которой выполнен анализ сходимости метода малого параметра на примере ползучести трубы из неоднородного реономного материала сравнением приближенного аналитического решения до третьего порядка величины малого параметра с численным решением этой же задачи.

Перечисленными выше работами и ограничивается круг решенных аналитических стохастических краевых задач ползучести. Если не пренебрегать упругой деформацией, то в любой конструкции будет происходить перераспределение напряжений во времени вследствие ползучести, а это является непреодолимым препятствием для построения аналитических решений. Поэтому необходимо разрабатывать другие подходы к решению стохастических краевых задач на основе численных методов.

Один из подходов к решению стохастических краевых задач при ползучести изложен в работе [133], в которой решается задача для толстостенной трубы, находящейся под действием внутреннего давления. Здесь вводится следующая гипотеза, позволяющая решать стохастическую краевую задачу. Так как толщина стенки трубы мала по сравнению с ее радиусом, было сделано предположение: на стохастическую природу материала в трубе влияет только длина трубы и не влияют радиус r и угол θ . При этом в пределах одного «образца» толстостенной трубы длиной l характеристики материала не меняются и зависят от конкретных значений выборки случайных величин из формул типа (1.4). Геометрические и силовые свойства считались детерминированными. Стохастическая краевая задача решалась с использованием метода статических испытаний – метода Монте-Карло на основе стохастического аналога (1.4), обобщенного на случай сложного напряженного состояния. Для каждой совокупности случайных величин и детерминированных параметров модели (1.4) была решена детерминированная краевая задача для трубы, затем были построены стохастические оценки неупругой деформации и времени разрушения. С помощью полученной информации удалось определить ресурс конструктивного элемента по деформационным и катастрофическим критериям отказа в вероятностной постановке.

Метод Монте-Карло неоднократно успешно применялся в теории ползучести и длительной прочности [4, 39, 136 и другие].

Также мало внимания в научной литературе уделено вопросам построения стохастических моделей пластичности и ползучести на микроуровне. Причина этого заключается, прежде всего, в том, что все феноменологические теории строятся на базе экспериментальных данных, но к настоящему времени почти не исследованы вопросы распределения деформаций пластичности и ползучести по пространственной и временной координатам. И подобные систематические экспериментальные исследования довольно скудно представлены в научной литературе, за исключением небольшого числа работ. Например, в работе Одинга И. А., Ивановой В. С., Бурдуковской В.В. и Геминова В. Н. [79] представлена экспериментальная информация по исследованию локальных деформаций ползучести. Методика эксперимента была такова: образцы из нескольких жаропрочных сталей делились на участки длиной $\Delta = 10$ мм, на которых в дальнейшем проводились замеры деформации ползучести за определенное время при разных значениях температур и напряжений. В работе [43] представлен стохастический анализ полученных экспериментальных данных. В работе [79] также представлены результаты испытаний по анализу локализации пластической деформации. Образцы аналогичным образом делили на участки длиной 10 мм, затем на этих участках измеряли пластическую деформацию. В результате на некоторых участках совсем не наблюдается деформация пластичности, другие же могли получить деформацию в 3-4 раза больше средней по всему объему.

Объемные исследования стохастических полей деформаций ползучести и пластичности были выполнены в работе Радченко В.П., Дудкина С.А., Тимофеева М.И. [99] и диссертации С.А. Дудкина [30], в которых приведены распределения деформаций по длине цилиндрических образцов в 40 мм из сплава АД1 по базе 2 мм. Предварительные исследования показали, что стохастические деформации пластичности и ползучести практически не влияют друг на друга и стохастические уравнения состояния для каждой из компонент реологической деформации можно строить независимо. Этот факт имеет большое значение в

механике упрочненных конструкций при исследовании релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести, поскольку при решении такого рода задач необходимо владеть информацией, влияет ли предварительная пластическая деформация после процедуры поверхностного пластического упрочнения на последующую ползучесть конструктивного элемента. Эта проблема более подробно будет рассмотрена в главе 2 настоящей диссертации.

Решению задачи оценки релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести предшествует решение задачи определения начального напряженно-деформированного состояния после процедуры упрочнения, которое играет роль начальных данных при решении краевых задач последующей ползучести. Определение остаточных напряжений является обратной задачей, которая и в теоретическом плане, и при использовании экспериментальных методов связана с большими проблемами.

Рассмотрим некоторые подходы для определения поля остаточных напряжений после различных процедур поверхностного упрочнения. Сначала отметим, что многие экспериментальные методы исследования остаточных напряжений, изложенные в работах [6, 9, 31, 32, 54, 82, 83, 84 и другие], позволяют определить одну или две компоненты тензора остаточных напряжений, а компоненты тензора остаточных пластических деформаций эти методы определить не позволяют. А этой информации недостаточно для решения последующих задач эксплуатации упрочненных деталей, поскольку не будет известно начальное напряженно-деформированное состояние после упрочнения.

Многие отечественные и зарубежные ученые предпринимают попытки решить задачу формирования остаточных напряжений после упрочнения численными и аналитическими методами. Численные методы [1, 7, 9, 42, 54, 152, 153 и другие], как правило, основываются на методе конечных элементов и рассчитаны на «идеальные» (с математической точки зрения) условия процесса упрочнения. Анализ литературы показывает, что численные методы определения остаточных напряжений применимы лишь в том случае, когда задача сво-

дится к классической краевой задаче термоупругости или к контактной задаче упругопластических тел. Для реальных же промышленных технологий упрочнения (обкатка роликом, гидро- и пневмодробеструйная обработка и т.д.) данные методы не применимы из-за стохастического характера процессов упрочнения. Например, при обкатке роликом происходит многократное прохождение ролика по поверхности: здесь большое значение имеют скорость вращения обрабатываемой детали, скорость подачи ролика, а также смазочный материал. В случае же пневмодробеструйной обработки происходят многократные хаотические столкновения микрошариков с обрабатываемой поверхностью.

Что касается аналитических методов определения остаточных напряжений, то они в большинстве своем относятся к краевым задачам термоупругости и термоупругопластичности, которые моделируют процесс термопластического упрочнения [42, 48, 159]. Например, в работе [159] были рассчитаны внутренние напряжения для цилиндрических образцов, изготовленных из стали SAE4140 ($42CrMo_4$), причем было достигнуто соответствие расчетных значений и экспериментальных, полученных рентгеновским методом. В работе [42] для определения остаточных напряжений в различных конструктивных элементах (замковые части диска турбины ГТД, различные концентраторы напряжений и т.д.) осуществляется моделирование процесса термопластического упрочнения с использованием комбинаций аналитических методов и метода конечных элементов.

Численные методы, реализующие схемы упрочнения качения одного предмета по другому или моделирующие воздействие виброударными нагрузками, базируются на теореме об упругой разгрузке [7, 147]. Однако возможность их применения ограничена единичными актами контактного взаимодействия. Напряженно-деформированное состояние в упрочненном слое, рассчитанное таким образом, оказывается далеко от реального из-за большого количества грубых допущений и предположений в математических моделях. Поэтому к результатам такого рода нужно относиться больше как к качественным, ис-

пользуя их, например, для обоснования тех или иных гипотез в механике упрочненных конструкций.

Отметим одну из попыток обобщения расчетно-экспериментальных методов для определения трех компонент тензора остаточных напряжений на основе решения обратной задачи, предпринятую в работах [179, 180]. Однако для получения замкнутого решения требуется определенная экспериментальная информация, определить которую чисто технически на сегодняшний день невозможно.

На основании изложенных фактов можно сделать следующий вывод: феноменологические расчетно-экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния в общем случае являются более предпочтительным, так как они оперируют частично известной экспериментальной информацией о распределении остаточных напряжений, которая соответствует реальной технологической процедуре упрочнения. В настоящей работе будет использован научно-обоснованный феноменологический метод восстановления полной картины НДС в поверхностно-упрочненном слое гладких (без концентраторов) цилиндрических образцов, описанный в работах В.П. Радченко и М.Н. Саушкина [124, 125, 142]. В этом подходе исходной информацией является одна или две определенные экспериментально компоненты тензора остаточных напряжений. Рассмотрим данную методику более подробно.

Так как объектами исследования в дальнейшем являются в том числе цилиндрические изделия, применяется стандартная цилиндрическая система координат r, θ, z . Окружная, радиальная и осевая компоненты тензора остаточных напряжений обозначаются соответственно $\sigma_{\theta}^{res}, \sigma_r^{res}, \sigma_z^{res}$; компоненты тензора пластических деформаций – q_{θ}, q_r, q_z . В данной методике авторы предлагают базовую гипотезу для компонент тензора пластических деформаций: $q_z(r) = \alpha q_{\theta}(r)$, где α – феноменологический параметр (показатель анизотропии упрочнения). Значение $\alpha = 1$ соответствует изотропному упрочнению (обработка поверхности микрошариками, ультразвуковое и термопластическое упрочнения,

азотирование), а $\alpha \neq 1$ соответствует анизотропному упрочнению (алмазное выглаживание, обкатка роликом, дорнование (и другие технологии)). В работах [124, 125, 142] установлено, что при известной экспериментальной эпюре σ_θ^{res} и величине α остальные компоненты тензоров остаточных напряжений и деформаций определяются так:

$$\sigma_r^{res}(r) = -\frac{1}{r} \int_r^R \sigma_\theta^{res}(x) dx; \quad (1.6)$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1+\alpha\mu)^2} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\mu}} \int_0^r x^{\frac{1+\alpha-\alpha\mu}{1+\alpha\mu}} [\sigma_r^{res}(x) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{res}(x)] dx - \\ - \frac{1+\mu}{E(1+\alpha\mu)} [(1-\mu)\sigma_\theta^{res}(r) - \mu\sigma_r^{res}(r)]; \quad (1.7)$$

$$q_z = \alpha q_\theta; \quad (1.8)$$

$$q_r = -q_\theta(1+\alpha); \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)] \right\} dr; \quad (1.10)$$

$$\sigma_z^{res}(r) = E(\varepsilon_z^0 - q(r)) + \mu(\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)), \quad (1.11)$$

где R – радиус цилиндра, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, ε_z^0 – полная осевая деформация, α – феноменологический параметр анизотропии упрочнения.

В результате порядок определения полей остаточных напряжения и пластических деформаций в сплошном цилиндре после процедуры поверхностного упрочнения выглядит следующим образом:

$$\sigma_\theta^{res}(r) \xrightarrow{(1.7)} \sigma_r^{res}(r) \xrightarrow{(1.8)} q_\theta(r) \xrightarrow{(1.9),(1.10)} q_z(r), q_r(r) \xrightarrow{(1.11)} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{(1.12)} \sigma_z^{res}(r). \quad (1.12)$$

Из схемы (1.12) видно, что компоненты σ_r^{res} , σ_z^{res} , q_θ , q_r , q_z вычисляются через σ_θ^{res} и параметр анизотропии α .

В случае изотропного упрочнения поверхности ($\alpha = 1$) схема (1.12) реализуется в явном виде. В случае же анизотропного упрочнения ($\alpha \neq 1$) в качестве исходных данных требуются две экспериментально полученные эпюры $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ и $\sigma_z^{res} = \sigma_z^{res}(r)$. Тогда для определения параметра анизотропии

производится вариация значения α и повторение схемы расчета (1.12) вплоть до достижения минимальной величины отклонения расчетных значений осевой и окружной эпюр тензора остаточных напряжений от экспериментальных. Применение алгоритма (1.12), а также методика идентификации параметра анизотропии α и аппроксимации экспериментально наблюдаемой эпюры $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ подробно изложены в работах [124, 125, 142].

В приведенных работах отмечено, что глубина определения экспериментальных данных $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ ограничивается областью сжатия (100 – 400 мкм), а сами экспериментальные данные имеют дискретный характер. В то же время схема (1.12) требует вычисления интегралов по всему объему интегрирования ($0 \leq r \leq R$). Отсюда следует, что необходимо иметь аналитическую аппроксимацию для компоненты $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$, причем должно выполняться условие самоуравновешенности

$$\int_0^R \sigma_\theta^{res}(r) dr = 0. \quad (1.13)$$

В общем случае данная аппроксимация имеет вид

$$\sigma_\theta^{res}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left[-\frac{(a-h^*-r)^2}{b^2}\right], \quad (1.14)$$

где h^* – расстояние от поверхности, на котором находится локальный минимум эпюры напряжений $\sigma_\theta^{res}(r)$, а параметры σ_0 , σ_1 и b вычисляются из условия (1.13) и некоторых характерных точек графика. Схематически график (1.14) показан на рис. 1.1 (здесь $h = R - r$ – толщина упрочненного слоя). Из графика следует, что при $h^* = 0$ локальный минимум $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(r)$ находится на самой поверхности цилиндра.

Используя схему (1.12) с учетом (1.13), (1.14), можно восстановить картину напряженно-деформированного состояния в упрочненном цилиндрическом образце в полном объеме, то есть определить все нормальные (диагональные) компоненты тензоров остаточных напряжений и деформаций (недиагональными компонентами в указанных работах пренебрегли в силу их малости).

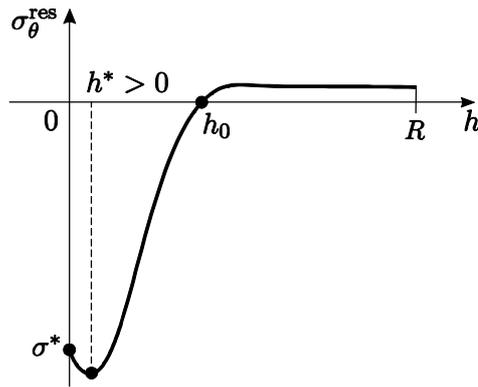


Рис. 1.1. Схематический график экспериментальной зависимости $\sigma_{\theta}^{res} = \sigma_{\theta}^{res}(h)$ в сплошном цилиндре. h^* – глубина, на которой значение эпюры максимально (по модулю), $h^* > 0$

Эта информация представляет большой интерес для задач последующей эксплуатации упрочненных цилиндрических образцов в поле внешних (рабочих) нагрузок. Примерами таких задач может служить деформирование упрочненных изделий в условиях высокотемпературной ползучести, при действии циклических нагрузок в условиях многоциклового нагружения и т.д., потому что поля созданных упрочнением напряжений и деформаций являются начальными данными в соответствующих краевых задачах. В этой связи далее выполнен анализ работ, в которых решаются подобные задачи.

Ранее было сказано о положительном эффекте остаточных напряжений, наведенных в элементах конструкций при нормальных температурах. Эффективность же остаточных напряжений при высоких температурах определяется тем, насколько они устойчивы к температурно-силовым нагрузкам. Большинство работ в этой области, выполненных как отечественными, так и зарубежными учеными, носят чисто экспериментальный характер. Приведем сначала основные результаты по релаксации остаточных напряжений, полученные из прямых экспериментальных исследований. Так, в работах российских ученых [40, 76, 151 и другие] было экспериментально доказано, что упрочнение положительно влияет на детали, которые эксплуатируются при повышенных температурах. В частности, в работе [40], например, установлено, что при обработке

цилиндрического образца из сплава ЖС6КП микрошариками произошел рост предела выносливости при температуре 800 °С с 328 до 368 МПа.

В то же время, во многих трудах отмечено резкое изменение полей остаточных напряжений из-за их релаксации при высоких температурах, при этом скорость релаксации растет с ростом температуры. В работах [41, 42] при температуре $T = 950$ °С за 2 часа на образцах из сплава ЖС6Ф, упрочненных дробью, максимальное (по модулю) напряжение упало с 1100 МПа до 750 МПа, а спустя 50 часов произошла практически полная релаксация остаточных напряжений.

В работе [101] анализировалась релаксация остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 в процессе термоэкспозиции при $T = 650$ °С в течение 100 и 500 часов для четырех режимов ультразвукового упрочнения. В работе было выявлено, что из-за ползучести под действием самоуравновешенных остаточных напряжений они срелаксировали лишь на 20 – 30 %, однако сохранили достаточно большое значение. Как известно, сплав ЭП742 широко используется для дисков ГТД, так что полученные результаты представляют большой интерес для авиадвигателестроения. Вообще количество (в основном экспериментальных) работ, анализирующих влияние температурно-силовых режимов нагружения на релаксацию теплонагруженных упрочненных деталей, достаточно велико, что говорит об актуальности этой задачи для современной промышленности. Экспериментальные исследования на эту тему можно найти в следующих работах российских ученых [32, 40, 42, 83, 172 и других].

Зарубежные исследователи также уделяют данной проблеме большое внимание. В работах [157, 164, 165, 166, 168, 169, 170, 175, 178, 181 и других], например, изучалось влияние температурно-силовых нагрузок на релаксацию остаточных напряжений в простейших упрочненных деталях; влияние циклических нагрузок на релаксацию остаточных напряжений рассматривалось в работах [158, 167, 171]. Так, в работе [170] было установлено быстрое падение остаточных напряжений в начальный период времени, которое затем замедлялось и

практически сошло на нет. Анализу здесь подвергались образцы из сплава на никелевой основе, упрочненные дробью, при выдержке от 10 до 100 часов при температурах 600 и 650 °С. Максимальная скорость релаксации остаточных напряжений достигалась на поверхности детали; также была установлена прямая зависимость между интенсивностью снижения остаточных напряжений и температурой.

В работе [165] авторский коллектив анализировал релаксацию остаточных напряжений в образцах из жаропрочного никелевого сплава IN100 после обработки дробью в условиях длительной термоэкспозиции при $T = 650$ °С. Здесь было установлено снижение остаточных напряжений с одновременным сохранением характера их распределения. Поскольку авторы не имели первичных кривых ползучести, теоретические методы описания релаксации остаточных напряжений в работе не приведены.

В научной литературе представлено крайне мало экспериментальных данных для случаев одновременного воздействия силовых и температурных факторов на упрочненные детали. Вероятно, это вызвано сложностью проведения подобных экспериментальных исследований – в настоящее время отсутствуют экспериментальные методы определения полей остаточных напряжений в образцах, находящихся под нагрузкой при высокой температуре. Рентгеновские (неразрушающие) методы определения остаточных напряжений [170, 173] дают лишь усредненные значения по глубине упрочненного слоя.

Многие экспериментальные металлофизические работы посвящены определению дислокационной структуры упрочненных образцов после температурно-силового нагружения. На основе полученной структуры авторы делают вывод о релаксации внутренних напряжений. В подобных работах увеличение скорости диффузии напрямую связывается с процессом релаксации: а именно, при повышении температуры из-за увеличения подвижности атомов диффузионные процессы снижают прочность граничных слоев. Этот подход объясняет

качественные характеристики процесса релаксации, однако никак не помогает в решении соответствующих краевых задач.

Рассмотрим теперь теоретические подходы решения задачи релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести для некоторых элементов конструкций. Одна из первых попыток решения такого рода задач предпринята в работах Колотниковой О.В. и Цейтлина В.И. [40, 151] применительно к упрочненным дробью цилиндрическим образцам из сплава ЖС6КП ($T = 800$ °С) и его модификации ЖС6УВИ ($T = 675$ °С), которые широко используются в авиадвигателестроении для изготовления лопаток турбины. Однако авторы этих работ использовали простейшую одноосную аналогию, считая цилиндрический образец состоящим из жестко скрепленных кольцевых стержневых элементов, тем самым сведя задачу лишь к определению кинетики единственной компоненты тензора остаточных напряжений – осевого напряжения $\sigma_z = \sigma_z(h, t)$ (h – глубина слоя). Но как следует из формул (1.7)-(1.12), после упрочнения дробью возникают и напряжения σ_θ и σ_r , которыми в данной работе пренебрегалось. По всей видимости, это связано с тем, что авторы [40, 151] связывали компоненту σ_z с пределом сопротивления усталости при одноосном нагружении и полагали, что она вносит решающий вклад в повышение сопротивления усталости.

В связи с этим стоит отметить работы Радченко В.П. и Саушкина М.Н. [124, 125, 143], в которых предложен хотя и приближенный, но наиболее общий и научно-обоснованный метод решения краевых задач релаксации остаточных напряжений. Согласно данному методу деформации деталей, развивающиеся со временем при температурно-силовом нагружении, описываются деформациями ползучести, а релаксация остаточных напряжений описывается как процесс, вызванный реологическими деформациями.

Ключевая идея этого подхода заключается в том, что деталь разделяется на «тело» и тонкий (около 200 мкм) упрочненный слой. Таким образом, задача делится на две самостоятельных подзадачи, объединение которых позволяет рассчитывать релаксацию остаточных напряжений образцов, находящихся в ре-

жиме температурно-силового нагружения. Тонкий поверхностный слой в данном подходе полагается «наклеенным» на поверхность «тела» и не оказывает влияния на жесткость конструкции в целом. При этом он подвергается деформации вместе со всей конструкцией в режиме «жесткого» нагружения. Граничными условиями здесь выступают заданные на поверхности компоненты тензоров деформаций.

Первая краевая подзадача заключается в определении напряженно-деформированного состояния всей конструкции, находящейся в условиях ползучести, вплоть до разрушения без учета упрочненного поверхностного слоя. Она решается итерациями по времени с использованием классических методов, основанных на численных методах дискретизации деталей (метод конечных элементов, метод сеток). При этом возможно использование любой теории ползучести, которая в состоянии описать кривые ползучести рассматриваемого материала.

Во второй краевой подзадаче поверхностный слой неотделим от «тела» детали, деформирующегося в режиме жесткого нагружения. Решение первой подзадачи дает значения компонент тензоров деформаций на поверхности детали. С этими граничными условиями исследуется релаксация остаточных напряжений в поверхностном упрочненном слое. С применением данного метода, в частности, удалось оценить релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести в упрочненном слое вращающейся лопатки [143].

Определенный шаг в решении краевых задач ползучести упрочненных конструкций сделан в работе [126], где разработан точный прямой метод, позволяющий в квадратурах получить зависимости для диагональных компонент тензора остаточных напряжений в задаче о ползучести растягиваемого упрочненного цилиндра. В работах [103, 130] этот метод был реализован для исследования влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений цилиндрического образца из сплава ЖС6КП [103] и влияния термоэкспозиции на релаксацию остаточных напряжений в цилиндрических образцах из

сплава ЖС6УВИ. Сопоставление с экспериментальными данными показало приемлемую точность для расчетных данных. В работе [134] выполнено обобщение методики работы [103, 130] на другие виды напряженного состояния – растяжение, кручение, растяжение и кручение и приведены многочисленные результаты расчетов при каждом виде напряженного состояния.

Второй класс точных решений для оценки релаксации остаточных напряжений при ползучести получен для плоских образцов [128, 98], в которых, в силу того что упрочненный слой достаточно тонкий, плоская деталь моделировалась упрочненным полупространством. Состояния для компонент остаточных напряжений также получены в квадратурах, выполнены расчеты для оценки релаксации остаточных напряжений в образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в процессе ползучести при термоэкспозиции, наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Однако предложенные в работах [103, 125, 128, 98, 134] методы пока не удалось обобщить на другие конструктивные элементы.

Таким образом, из приведенного анализа следует, что большинство работ по оценке релаксации остаточных напряжений в условиях высокотемпературного нагружения, во-первых, носит экспериментальный характер, а, во-вторых, исследования были проведены лишь для частного вида конструктивных элементов в детерминированной постановке в основном в условиях термоэкспозиции. Число теоретических исследований крайне ограничено, кроме того, практически не изучено влияние силовых нагрузок на релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести как в детерминированной, так и стохастической постановках.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1

Выполненный литературный обзор позволяет сделать следующие выводы:

1) в научной литературе достаточно глубоко проработаны подходы к построению феноменологических стохастических макромоделей ползучести для первой и второй стадий, однако методика идентификации случайных величин этих моделей основана на статистической обработке результатов испытаний партий образцов в условиях ползучести, что не учитывает локальные деформационные характеристики по пространственной координате в пределах одного образца;

2) отсутствуют методы решения стохастических краевых задач механики упроченных конструкций в условиях ползучести;

3) в настоящее время в научной литературе представлен широкий набор физических и механических методов экспериментального определения остаточных напряжений, имеющих соответствующее теоретическое обоснование; однако почти все предлагаемые методы позволяют определить максимум две компоненты тензора остаточных напряжений и не позволяют определить компоненты тензора остаточных пластических деформаций;

4) задача теоретического определения остаточных напряжений после упрочнения решается, как правило, численными и аналитическими методами. Однако численные методы в основном базируются на методе конечных элементов и рассчитаны на «идеальные» (с математической точки зрения) условия процесса. Они применимы лишь в том случае, когда задача сводится к классической краевой задаче термоупругости или к контактной задаче упругопластических тел. Аналитические методы определения остаточных напряжений в большинстве своем относятся к краевым задачам термоупругости и термоупругопластичности, которые моделируют процесс термопластического упрочнения;

5) существует значительное количество работ, анализирующих влияние температурно-силовых режимов нагружения на релаксацию теплонагруженных упрочненных деталей. Однако подавляющее большинство этих работ, во-первых, носит экспериментальный характер, а, во-вторых, исследования выполнены в основном лишь для случая термоэкспозиции образцов. Число теоретических исследований крайне ограничено, кроме того, практически не изучено влияние силовых нагрузок на релаксацию остаточных напряжений в процессе ползучести.

Вышеизложенные тезисы позволяют сформулировать основные задачи данной работы:

1) проведение комплексного анализа стохастических полей реологических деформаций, микротвердости и шероховатости в пределах рабочей части цилиндрических образцов из сплава АД1 для оценки влияния предварительной пластической деформации на последующую ползучесть;

2) проведение экспериментального исследования стохастических полей деформации ползучести по пространственно-временным координатам в полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125$ °С;

3) построение феноменологических стохастических уравнений ползучести в условиях одноосного и сложного напряженных для состояний сплава Д16Т при $T = 125$ °С и их экспериментальная проверка;

4) разработка методики идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющей сократить объем определяющих экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней величины;

5) разработка метода численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий и его реализация для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения;

б) исследование релаксации остаточных напряжений и получение статистических оценок для полей остаточных напряжений в процессе ползучести полого цилиндра из сплава Д16Т в различные временные сечения;

7) проведение комплексного анализа влияния режимов поверхностного пластического упрочнения пневмодробеструйной обработкой, ползучести в условиях термоэкспозиции, многоциклового нагружения на формирование и кинетику остаточных напряжений, характеристики микротвердости и шероховатости, металлофизическое состояние материала в поверхностно упрочненных плоских и цилиндрических образцах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ

Результаты данной главы излагаются в соответствии с работами автора диссертации [55-58, 72, 105, 108, 111, 113, 114, 116].

2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, МАКРОСТРУКТУРЫ, МИКРОТВЕРДОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА АД1

2.1.1. Постановка задачи

Как уже отмечено в разделе 1, на поля деформаций и напряжений значительно влияют флуктуации механических характеристик материала. Отсюда возникает следующая задача: создать феноменологические модели, которые описывают стохастические поля перемещений и деформаций по пространственным и пространственно-временным координатам в условиях реологического деформирования. Данные модели являются базой для решения стохастических краевых задач реологии и механики упрочненных конструкций. В основе построения такого рода моделей лежат экспериментальные данные.

Однако получение полей распределения реологических деформаций по пространственной и временной координатам – крайне сложный и длительный эксперимент. Одна из проблем заключается в разделении неупругой деформа-

ции на пластическую деформацию и деформацию ползучести. В области ползучести диаграмма упругопластического деформирования зависит от скорости нагружения, поскольку деформирование образца вплоть до разрушения происходит с заданной скоростью за конечное время. Поэтому за время нагружения образование деформации пластичности будет сопровождаться и накоплением деформации ползучести, причем, чем меньше скорость нагружения, тем больше к финишу накопится деформация ползучести. В этом плане, строго говоря, отделить деформацию пластичности от деформации ползучести, затруднительно. Поэтому в дальнейшем под деформацией пластичности будем понимать неупругую деформацию на диаграмме «упругопластического» деформирования, полученную с максимально возможной скоростью нагружения (в режиме «жесткого» нагружения), которая возможна на испытательной машине. Фиксация же деформации ползучести производится при испытаниях при постоянных напряжениях в процессе определенной выдержки во времени.

Вторая проблема состоит в построении стохастической модели ползучести после предварительного пластического деформирования. Здесь возникает вопрос: влияет ли предварительная пластическая деформация на последующее образование стохастического поля деформации ползучести по пространственной переменной? Эта задача актуальна для поверхностно пластически упрочненных деталей, поскольку после процедуры упрочнения в тонком приповерхностном слое детали возникает неоднородное поле пластических деформаций. При последующих испытаниях в условиях ползучести происходит релаксация наведенных остаточных напряжений в детали. Для решения же стохастических краевых задач релаксации необходимо иметь стохастическую модель ползучести материала. А для построения модели (и планирования соответствующего эксперимента) необходим предварительный анализ влияния предварительной пластической деформации на последующую ползучесть материала и наоборот. Этот вопрос исследовать глубоко невозможно только с помощью непосредственного замера локальных полей деформаций пластичности и ползучести, для

этой цели необходимо привлекать и комплексные исследования физико-механического состояния материала и поверхностного слоя в условиях «чистых» упругопластических испытаний, испытаний в режиме ползучести, а также при чередовании деформирования в области пластичности и ползучести.

Отметим, что первая попытка исследования стохастических одномерных полей пластической деформации и деформации ползучести была предпринята в экспериментальной работе В.П. Радченко, С.А. Дудкина и М.И. Тимофеева [99], часть этих исследований легли в основу диссертационной работы С.А. Дудкина [30], где подробно описана методика экспериментальных исследований, средства измерений деформации, характеристики цилиндрических образцов из сплава АД1 для испытаний и результаты корреляционного анализа полей деформаций ползучести и пластичности. Для более глубокого понимания вопроса взаимного влияния деформаций ползучести и пластичности в данной главе приводятся результаты дополнительных исследований характеристик шероховатости и микротвердости испытанных в [30, 99] образцов, которые с выполненным в [30, 99] корреляционным анализом позволяют сделать более глубокие выводы относительно характера формирования стохастических полей деформаций ползучести и пластичности. В соответствии с вышеизложенным в разделе 2.1 ставятся и решаются следующие задачи:

1) провести исследование макроструктуры поверхностного слоя образцов после испытаний в условиях упругопластического деформирования и ползучести;

2) выполнить измерение микротвердости и шероховатости поверхностного слоя образцов после испытаний в условиях упругопластического деформирования и ползучести;

3) на основе корреляционного анализа, анализа макроструктуры, а также результатов измерения микротвердости и шероховатости поверхностного слоя установить структуру полей микродеформации пластичности и ползучести и

дать рекомендации по построению феноменологических стохастических моделей реологического деформирования.

2.1.2. Методика проведения экспериментальных исследований одноосного распределения неупругой деформации в цилиндрических образцах из сплава АД1

Экспериментальные исследования распределения деформаций ползучести и пластичности по длине образцов были выполнены в работе [99], их результаты приведены также в диссертации [30]. Однако, поскольку эти данные были использованы и в настоящей диссертационной работе, кратко опишем методику эксперимента и его результаты согласно [30].

Образцы и программа испытаний. Цилиндрические образцы диаметром 4 мм и длиной – 40 мм изготавливались из прутка прессованного из технически чистого алюминия АД1 с химическим составом по ГОСТ 4784-74[28]: Al – 99,3%; Fe – 0.30%; Si – 0.30%; Cu – 0.05%; Mg – 0.05%; Mn – 0.025%; Zn – 0.1%; Ti – 0.15%; проч. – 0.02%.

Согласно [30]: «С целью выявления распределения остаточной деформации по длине образца на боковой поверхности на расстоянии 2 мм друг от друга с помощью конусообразного индентора наносились контрольные лунки. Внешний вид нанесенных лунок представлен на рис. 2.1.

Для измерения расстояния между контрольными лунками и последующего определения разброса остаточной неупругой деформации по длине образца использовался большой инструментальный микроскоп БМИ-1Ц с цифровым показывающим устройством УЦП-1М, имеющим цену деления 1 мкм. Для увеличения точности результатов измерение удлинения проводились дважды - в прямом и обратном направлениях. Затем значения двух замеров усреднялись».

Для контроля замеров проводилось сравнение суммарного удлинения всех участков образца с удлинением самого образца.

Образцы в ходе исследования подвергались испытаниям по следующим программам [30]:

« 1) упругопластическое ступенчатое нагружение до разрушения с накоплением неупругой деформации 1-2% на каждой ступени;

2) ступенчатое нагружение на ползучесть до разрушения при постоянном напряжении с накоплением необратимой деформации 1-2% на каждой ступени;

3) комбинированный режим с чередованием упругопластического деформирования и деформирования на ползучесть при постоянном напряжении до значения накопленной деформации 1-2 % на каждой ступени.

Во всех режимах испытаний после каждой ступени нагружения производилась разгрузка и замер локального поля остаточных деформаций».

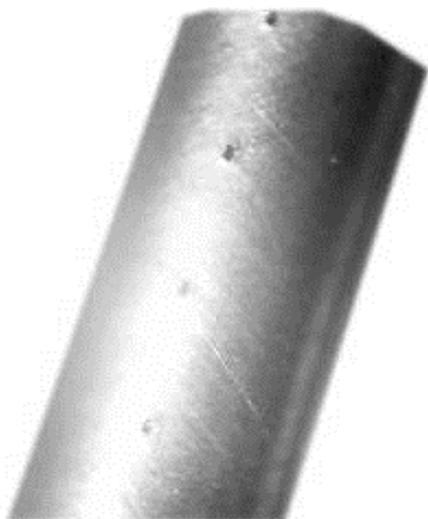


Рис. 2.1. Контрольные лунки на поверхности образца №121, увеличение $\times 9$

Всего в [30, 99] было испытано 37 цилиндрических образцов по разным программам нагружения, из них 8 образцов были подвержены испытаниям на определение анизотропии без замеров локальных полей деформаций, при этом различие данных по упругопластическому деформированию этих 8 образцов, вырезанных из заготовки в продольном и поперечном направлениях, оказались статистически не значимыми. Поэтому в дальнейших исследованиях материал считался однородным. Остальные 29 образцов, испытанных в [30, 99] по ука-

занным выше программам, в настоящей работе были подвергнуты дополнительному экспериментальному исследованию физико-механических характеристик поверхностного слоя и материала.

Изучение макроструктуры. Для исследования макроструктуры поверхностного слоя образцов использовался металлографический микроскоп с большой глубиной фокуса МБС-10 (рис. 2.2), с рабочим увеличением от $\times 1,6$ до $\times 60$. С помощью данного микроскопа были сделаны фотографии поверхностей образцов при увеличении $\times 16$, $\times 32$, $\times 56$.



Рис. 2.2. Металлографический микроскоп МБС-10

Измерение микротвердости. Для измерения микротвердости поверхностного слоя применялся металлографический микроскоп ММ-6 фирмы «Leitz» (рис. 2.3), позволяющий производить металлографические исследования при увеличении от $\times 50$ до $\times 1600$ (с использованием иммерсии) и оснащенный приставкой для измерения микротвердости по Кнуппу. Способ измерения заключается в том, что в исследуемый образец погружается индентор, представляющий собой алмазную пирамидку, у которой соотношение продольной и поперечной диагонали составляет 7:1. Двугранный угол при вершине пирамидки равен $172^{\circ} 30'$. Отпечатки на поверхности образца представлены на рис. 2.4.

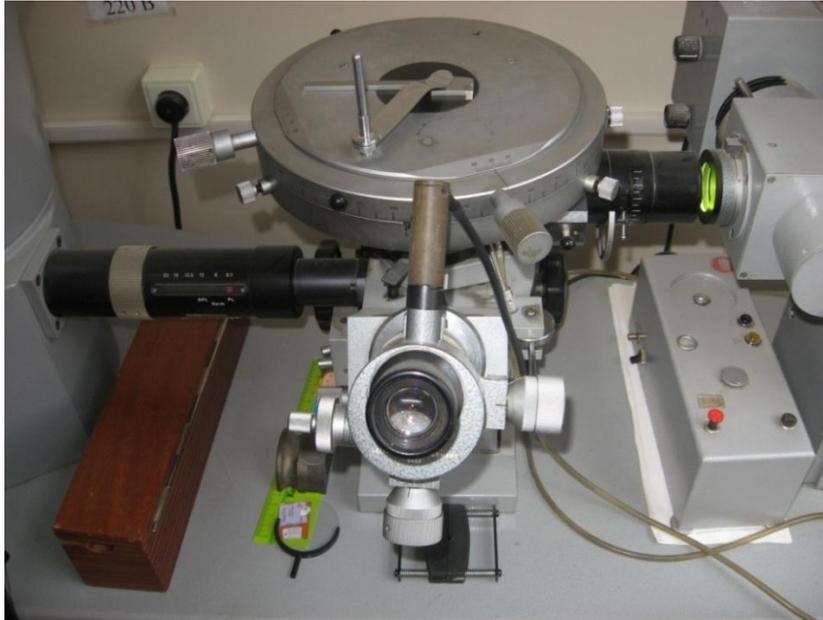


Рис. 2.3. Микротвердомер ММ-6

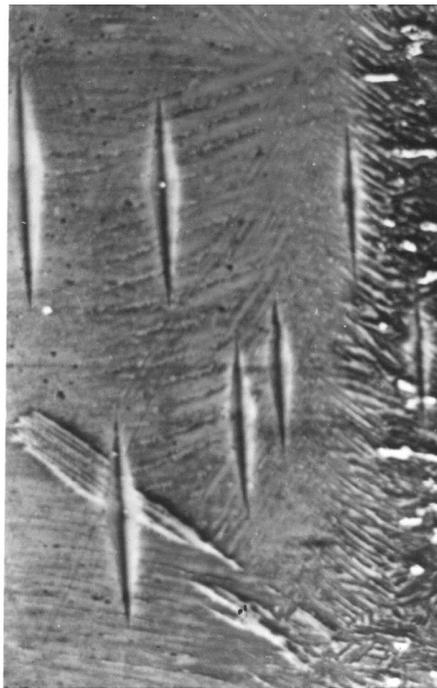


Рис. 2.4. Отпечатки при измерении микротвердости по Кнуппу

Значения микротвердости по Кнуппу рассчитывались по формуле:

$$\text{НК} = 14230 \cdot \frac{P}{d^2},$$

где P – прикладываемая нагрузка (во всей серии экспериментов $P = 50$ г); d – длина большей диагонали отпечатка (см. рис. 2.5).

Обязательным условием при измерении микротвердости по Кнуппу является то, что база измерения микротвердости образца должна быть как минимум в 3 раза длиннее диагонали (рис. 2.5).

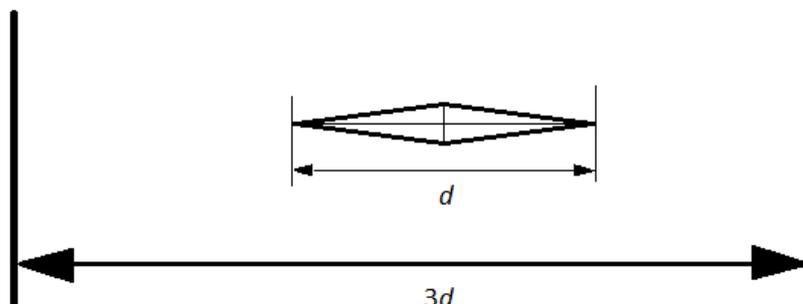


Рис. 2.5. Соотношение ширины базы исследуемого образца и длины диагонали

Глубину отпечатка, используя значение угла при вершине ($172^{\circ} 30'$) и зная длину большей диагонали, можно вычислить (рис. 2.6). Соотношение глубины проникновения пирамидки и длины диагонали составляет примерно 1:30.

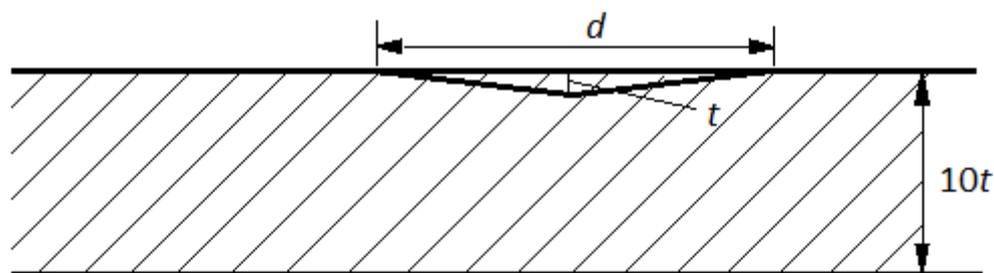


Рис. 2.6. Соотношение глубины отпечатка и длины диагонали

На разрушенных и неразрушенных цилиндрических образцах измерение микротвердости проводилось в рабочей зоне вдоль оси образца. Следует отметить, что допускается незначительная погрешность в полученных результатах, так как замеры микротвердости по Кнуппу были затруднены ввиду неровности рельефа. Схема измерения микротвердости показана на рис. 2.7. Шаг измерения составлял в зоне I – примерно 100 мкм, в зоне 2 – 0,5-2 мм.

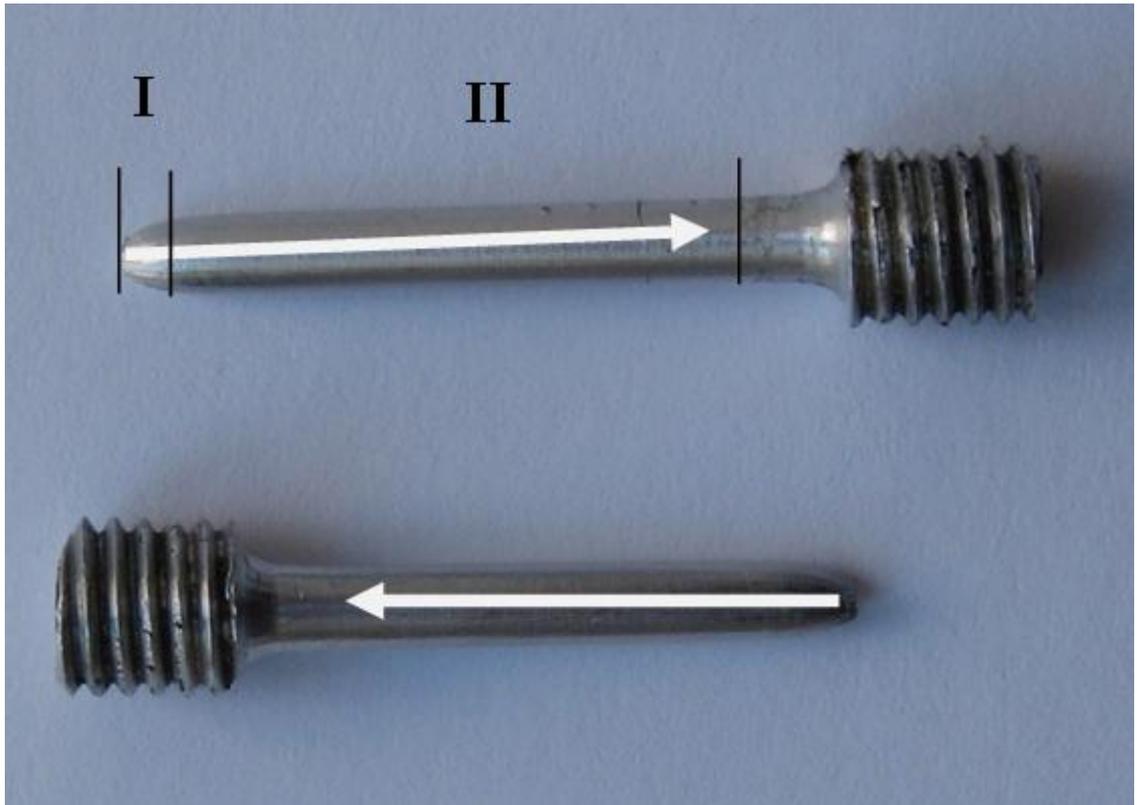


Рис. 2.7. Схема измерения микротвердости цилиндрических образцов

Измерение шероховатости. Шероховатость поверхностного слоя определялась при помощи прибора для измерения шероховатости поверхности «Surftest SJ-201 P» (рис. 2.8). Диапазон его измерений по оси X составляет 12,5 мм, по оси Z – 350 мкм. Здесь ось X направлена вдоль движения щупа, а ось Z – вглубь измеряемой поверхности. При измерении использовался щуп в виде алмазной иглы.

Схема измерения шероховатости приведена на рис. 2.9. Длина каждого замера – 12,5 мм. Исследование шероховатости в указанных зонах производилось по следующим параметрам: R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам (в расчет формулы входят $H_{i\ max}$ – отклонение пяти наибольших максимумов профиля, $H_{i\ min}$ – отклонение пяти наибольших минимумов профиля); R_q – среднее квадратичное отклонение профиля.



Рис. 2.8. Прибор для измерения шероховатости «Surftest SJ-201 P»



Рис. 2.9. Схема измерения шероховатости

2.1.3. Результаты испытаний, их стохастический и корреляционный анализ

Как отмечено выше, в [30, 99] экспериментально определены поля неупругих деформаций в 25 продольных и 12 поперечных цилиндрических образцах из сплава АД1.

Первой программе испытаний (упругопластическое ступенчатое нагружение) было подвергнуто 6 образцов, второй (ступенчатое нагружение на ползучесть) – 17, третьей (комбинированный режим с чередованием накопления деформации ползучести и пластичности) – 6. Модуль Юнга принимался равным среднему значению $E = 69000$ МПа.

Рассмотрим подробно два типичных результата, полученных в работах [30, 99], и выводы, которые сделали авторы указанных работ. Для первой программы испытаний (упругопластическое деформирование при ступенчатом увеличении напряжения вплоть до разрушения) на рис. 2.10 показана стандартная (интегральная) диаграмма упругопластического деформирования образца № 108. Точки соответствуют моментам разгрузки и замера остаточных пластических деформаций по длине образца. На рис. 2.11 представлено распределение пластической деформации ϵ^p по длине образца для данных точек, при этом се-

чения вдоль оси ординат соответствуют координатам лунок кернения по отношению к первоначальной длине образца l_0 . Пиковое значение деформации на рис. 2.11 соответствует появлению шейки. Из анализа графиков на рис. 2.11 можно сделать вывод о том, что при различных значениях напряжений (точки 1-11) имеет место эффект подобия эпюр распределения пластической деформации по длине образца. Исключение составляет лишь зона, прилегающая к шейке на этапе разупрочнения.

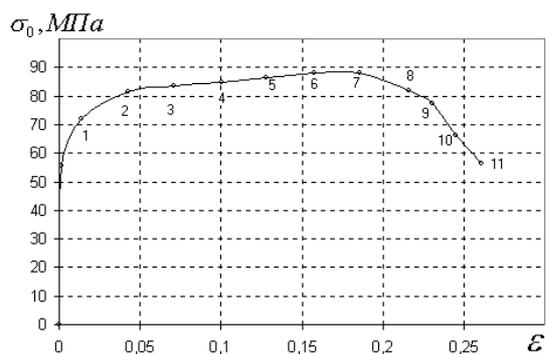


Рис. 2.10. Диаграмма упругопластического макродеформирования образца №108 [30]

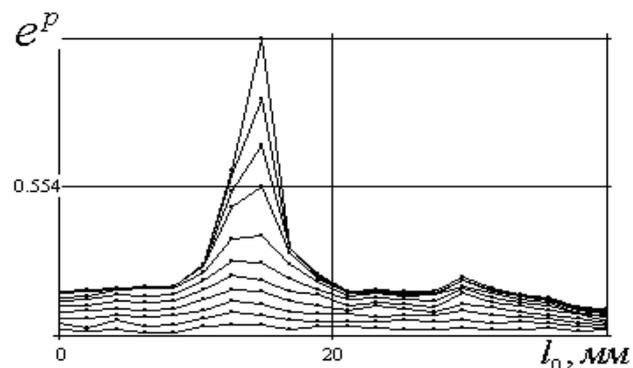


Рис. 2.11. Распределение микропластической деформации по длине образца №108, l_0 – первоначальная длина образца [30]

Гипотеза подобия косвенно подтверждается также значениями нормированной корреляционной функции, которые определялись по формулам:

$$\begin{aligned}
 M[e_k^p] &= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T e_{kj}^p, M[e_s^p] = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T e_{sj}^p; \\
 K(e_k^p, e_s^p) &= \frac{1}{T-1} \sum_{j=1}^T (e_{kj}^p - M[e_k^p]) \times (e_{sj}^p - M[e_s^p]); \\
 S(e_t^p) &= \sqrt{K(e_t^p, e_t^p)}, r(e_k^p, e_s^p) = \frac{K(e_k^p, e_s^p)}{S(e_k^p) \cdot S(e_s^p)},
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

где e_{ij}^p - пластическая деформация в j -ой точке кернения на i -ой степени нагружения ($i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, T}$; N – число ступеней нагружения; T – число точек кер-

нения); $M[\bullet]$ - символ математического ожидания; $K[\bullet, \bullet]$ - корреляционная функция, $r[\bullet, \bullet]$ - нормированная корреляционная функция.

В таблице 2.1 в качестве примера представлены типичные результаты расчета нормированной корреляционной функции $r[e_{kj}^p, e_{sj}^p]$ для образца № 108. Из таблицы видно, что корреляционная функция принимает достаточно большие значения (от 0,6 до 1), особенно на ранней стадии деформирования. Отсюда можно сделать вывод о хорошей коррелированности векторов e_{kj}^p, e_{sj}^p и, следовательно, подобии графиков распределения пластической деформации по длине образца на каждой ступени (в первом приближении).

Таблица 2.1

Значения нормированной корреляционной функции для деформации пластичности e_k^p ($k = \overline{1,11}$) образца №108 [30]

К	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00	0.76	0.67	0.62	0.60	0.60	0.60	0.63	0.63	0.63	0.63
2		1.00	0.88	0.84	0.83	0.82	0.79	0.77	0.74	0.71	0.66
3			1.00	0.96	0.96	0.96	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76
4				1.00	0.98	0.98	0.95	0.91	0.87	0.83	0.79
5					1.00	0.98	0.95	0.90	0.85	0.81	0.76
6						1.00	0.98	0.95	0.91	0.87	0.83
7							1.00	0.98	0.95	0.92	0.88
8								1.00	0.99	0.97	0.94
9									1.00	0.99	0.97
10										1.00	0.99
11											1.00

Рассмотрим теперь типичные результаты экспериментов для других программ испытаний. Для образца №104 на первом этапе были проведены две ступени упругопластического нагружения. Соответствующая диаграмма деформирования приведена на рис. рис. 2.12, а распределение пластической деформации по длине этого образца – на рис. 2.13. Далее были выполнены 10 ступеней нагружения на ползучесть при напряжении $\sigma = 90$ МПа. Осредненная деформация ползучести для всего образца на каждой ступени достигала соответственно значений:

$$\langle p \rangle = \{2,95 \cdot 10^{-2}; 5,45 \cdot 10^{-2}; 8,05 \cdot 10^{-2}; 1,11 \cdot 10^{-1}; 0,14; 0,168; 0,192; 0,21; 0,245; 0,266\}.$$

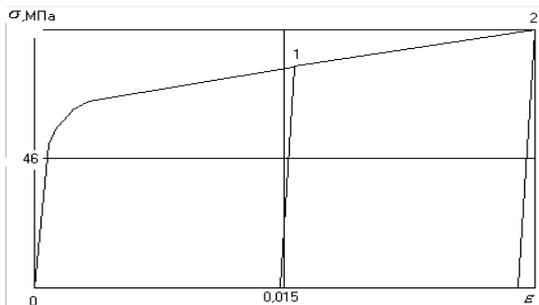


Рис. 2.12. Диаграмма упругопластического макродеформирования образца №104 [30]

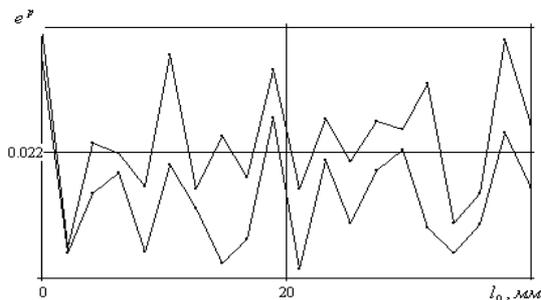


Рис. 2.13. Распределение микропластической деформации по длине образца №104, l_0 – первоначальная длина образца [30]

После каждой ступени нагружения производились разгрузка и промер локального поля деформаций ползучести. Рис. 2.14 иллюстрирует распределение деформации ползучести по длине образца. Значения нормированной корреляционной функции приведены в таблице 2.2.

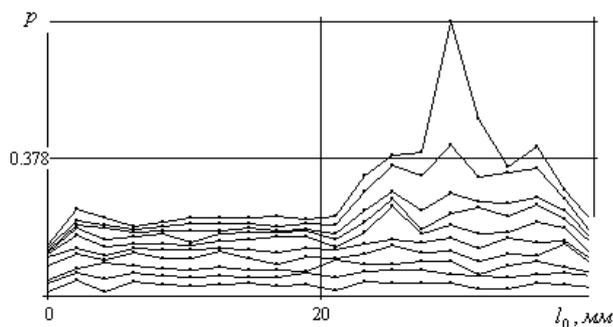


Рис. 2.14. Распределение деформации ползучести по длине образца №104 (10 ступеней), l_0 – первоначальная длина образца [30]

Таблица 2.2

Значения нормированной корреляционной функции для деформации пластичности e_k^p ($k = \overline{1,2}$) и ползучести p_k ($k = \overline{1,10}$) образца №104 [30]

	P1	P2	p3	P4	p5	P6	p7	p8	P9	p10	e_1^p	e_2^p
p1	1.00	0.81	0.29	0.53	0.46	0.51	0.39	0.36	0.30	0.25	-0.13	-0.26
p2		1.00	0.52	0.67	0.57	0.65	0.55	0.55	0.49	0.33	-0.09	-0.18
p3			1.00	0.60	0.62	0.48	0.41	0.54	0.54	0.42	-0.33	-0.45
p4				1.00	0.82	0.72	0.60	0.63	0.57	0.40	0.01	-0.10
p5					1.00	0.82	0.78	0.86	0.84	0.68	-0.08	-0.16
p6						1.00	0.92	0.89	0.82	0.63	-0.16	-0.18
p7							1.00	0.95	0.88	0.73	-0.27	-0.21
p8								1.00	0.97	0.84	-0.19	-0.16
p9									1.00	0.91	-0.11	-0.13
p10										1.00	0.00	-0.03
e_1^p											1.00	0.80
e_2^p												1.00

Анализ данных из таблицы 2.2 также позволяет сделать вывод о существенной коррелированности векторов деформаций одного вида (соответствующие значения отмечены темным цветом) и плохой коррелированности между векторами e_i^p и p_j , т.е. между деформациями пластичности и ползучести, при этом небольшие значения нормированной корреляционной функции для векторов p_j ($j = \overline{1,3}$) с векторами p_j ($j = \overline{4,10}$), по-видимому, связано с погрешностями изменения относительно малых значений деформации ползучести на начальных ступенях нагружения. Аналогичные результаты получены и во всех других экспериментах.

Анализ данных соответствующих значений нормированных корреляционных таблиц позволил сделать нижеследующие выводы авторам работ [30, 99], в частности в [30] отмечается:

« 1) имеет место значительный разброс локальной неупругой деформации по длине образца, достигающий 50-70%;

2) наблюдается хорошая коррелированность каждой из компонент неупругой деформации одного типа по длине образца, в зависимости от накопленной макросредней (интегральной) ее величины;

3) наблюдается слабая коррелированность полей деформации пластичности и ползучести, распределенных по длине образца».

Полученные выводы дают хорошую базу для построения феноменологической теории стохастического характера. Основываясь на них, авторы работ [30, 99] выдвинули ряд гипотез касательно полей деформаций пластичности и ползучести, в частности, в [30] отмечается следующее. Во-первых, слабая коррелированность полей деформации пластичности и ползучести говорит, вероятно, о разных механизмах образования этих деформаций.

Во-вторых, хорошая коррелированность полей деформации одного типа позволяет предположить подобие полей как для пластической деформации, так и для деформации ползучести (по отдельности). Это позволяет представить распределение полей неупругой деформации ползучести и деформации пластичности в следующем виде:

$$e^p = a_1(x)f_1(\mathbf{S}) + \mathbf{x}_1(x), p = a_2(x)f_2(t, \mathbf{S}) + \mathbf{x}_2(x, t), \quad (2.2)$$

где $a(x)$ – случайная функция пространственной координаты x ; $f_1(\mathbf{S})$ – неслучайная функция макронапряжения, выполняющая функцию коэффициента подобия для векторов деформации пластичности; $f_2(t, \mathbf{S})$ – неслучайная функция времени, выполняющая функцию коэффициента подобия для векторов деформации ползучести при постоянном напряжении; $\mathbf{x}_1(x)$ и $\mathbf{x}_2(x, t)$ – случайные функции распределения малых отклонений («шума») от главной случайной части деформации.

Фактически эти введенные гипотезы означают, что полная (стохастическая) деформация является аддитивной составляющей стохастических компонент – деформаций пластичности и ползучести, при этом не наблюдается влияния деформации одного вида на характер и эволюцию деформации другого вида. Однако для более глубокого обоснования этой гипотезы в настоящей дис-

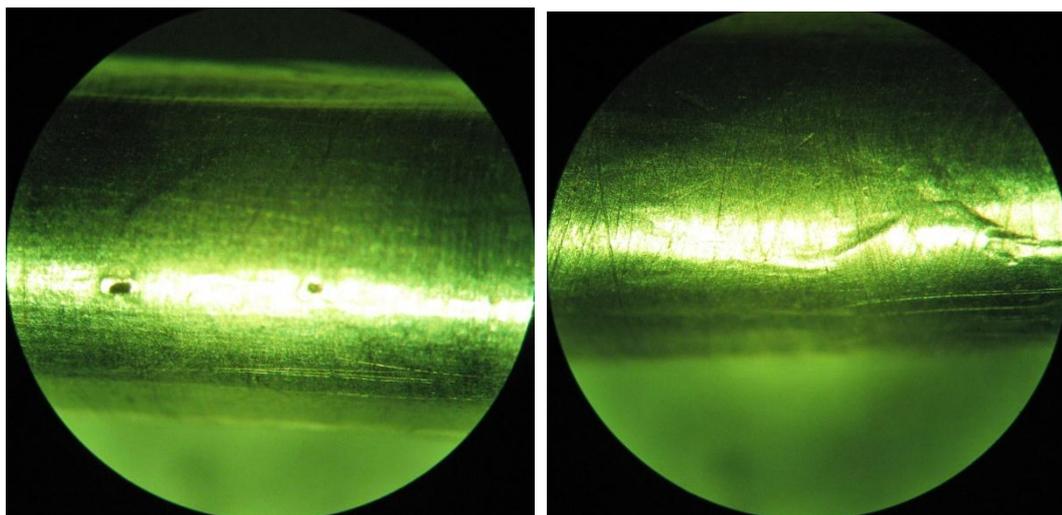
сертационной работы выполнены дополнительные экспериментальные исследования структурного состояния материала цилиндрических образцов из сплава АД1.

На этапе проведения макроструктурного анализа поверхности образцов после различных режимов испытаний были сфотографированы с увеличением от $\times 16$ до $\times 56$.

Установлено, что наиболее гладкая поверхность характерна для образцов, испытанных на ползучесть, вне зависимости от направления изготовления образца (вдоль и поперек к оси заготовки). На рис. 2.15 представлены фотографии поверхностного слоя образцов после испытаний в условиях ползучести при увеличении $\times 32$.

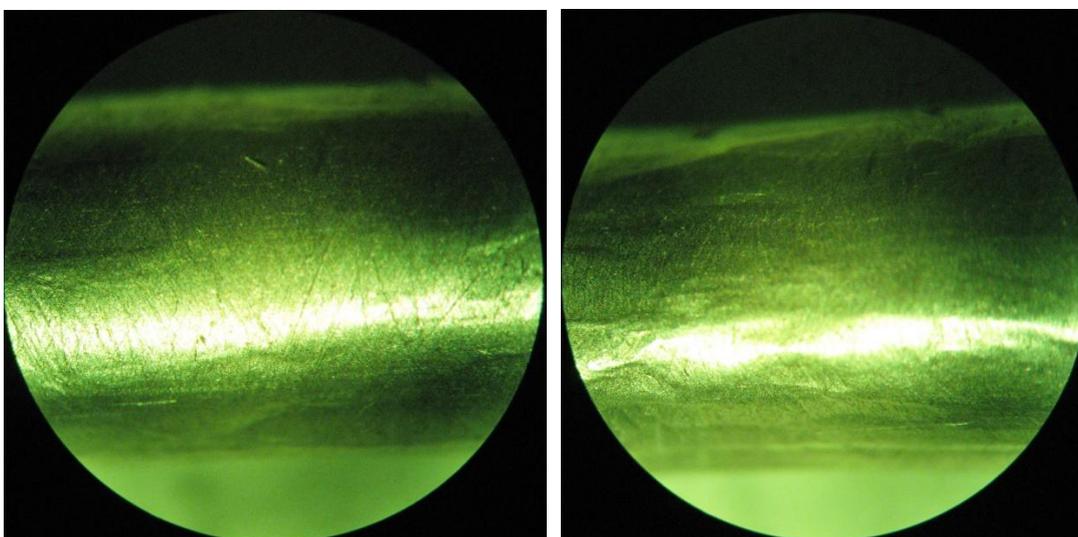
Поверхность образцов, испытанных в условиях пластического деформирования, имеет ярковыраженную неровность рельефа (рис.2.28).

Визуальные данные будут в дальнейшем подтверждены результатами, полученными при измерении шероховатости. Рис. 2.29 содержит информацию по результатам измерения шероховатости в образцах, испытанных на ползучесть (рис. 2.29, а) и в условиях пластического деформирования (рис. 2.29, б). Графики построены в одном и том же масштабе.



а

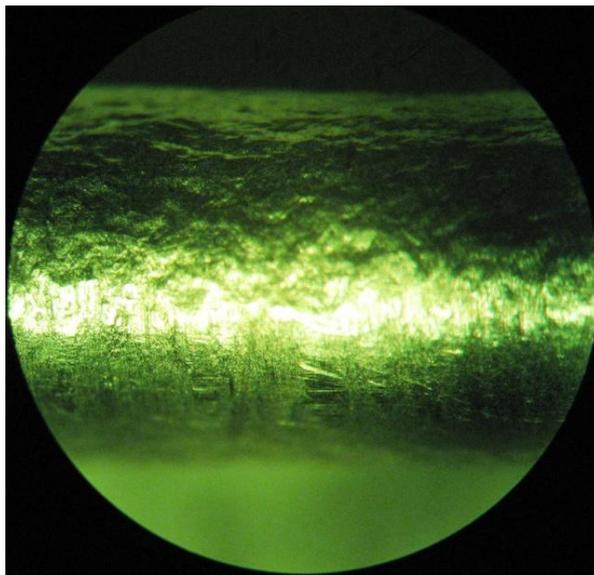
б



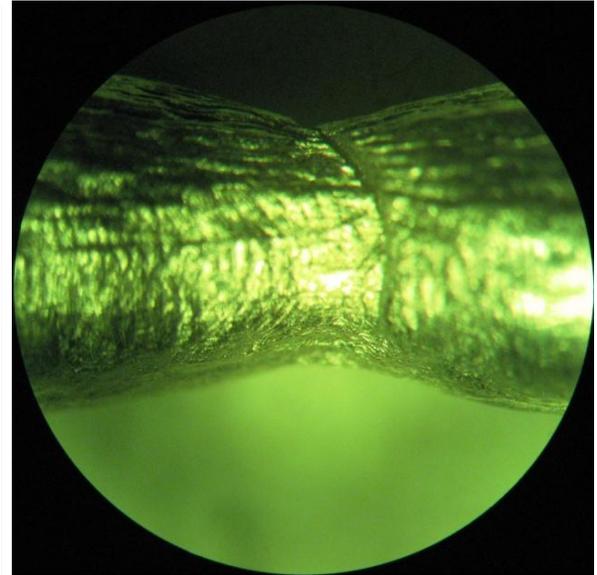
в

г

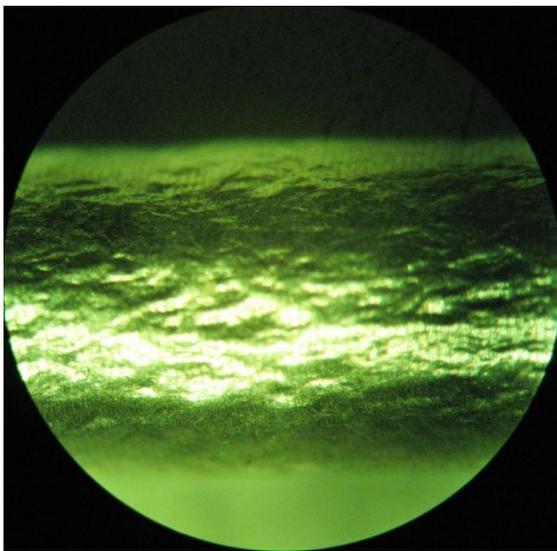
Рис. 2.15. Внешний вид образцов, изготовленных в продольном направлении заготовки и испытанных в условиях ползучести: а - №107, х32; б - №121, х32; в - №122, х32; г - №123, х32



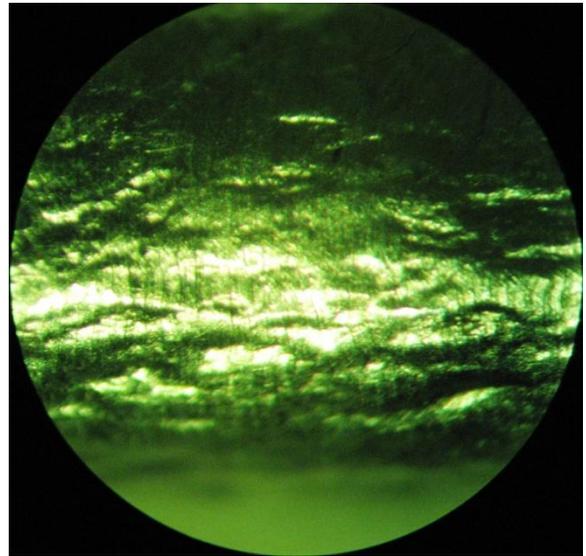
а



б



в



г

Рис. 2.16. Внешний вид образцов, изготовленных в поперечном направлении заготовки и испытанных в условиях пластического деформирования: а - №206, х32; б - №203, х32; в - №204, х32; г - №210, х56

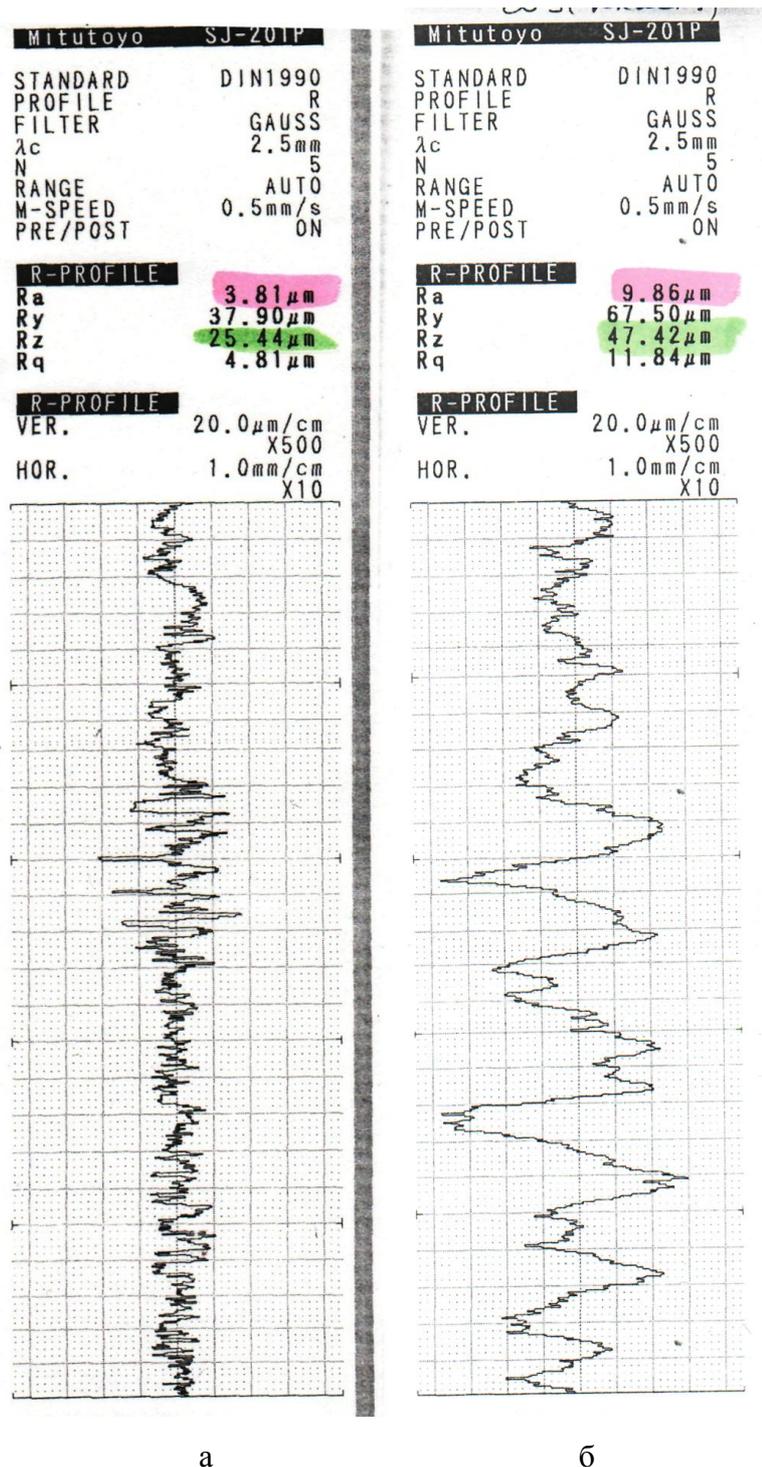


Рис. 2.17. Внешний вид профилограммы при различных режимах испытаний: а – № 117 (образец испытан на ползучесть); б – № 203 (образец испытан на пластичность)

Таблица 2.3 содержит полную информацию о значениях показателей шероховатости (R_a , R_y , R_z , R_q) для всех образцов. Здесь R_a – среднее арифметиче-

ское из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины; R_y – наибольшая высота профиля; R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины; R_q – среднее квадратическое значение отклонений профиля в пределах базовой длины.

Таблица 2.3

Результаты измерения шероховатости

№	Режим	R_a , мкм	R_y , мкм	R_z , мкм	R_q , мкм
101	пласт - 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	4,55	32,00	21,13	5,48
102	пласт – 10ти кратн. (продольный)	1,41	11,46	9,52	1,75
108	пласт – 11 ступ. упр. пласт. нагруж. - разрушение	2,11	14,51	9,93	2,55
111	пласт – 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	1,19	10,45	7,70	1,48
112	пласт – 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	5,66	32,24	23,37	6,71
113	пласт – 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	6,89	51,97	32,46	8,16
114	пласт – 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	7,97	48,92	42,66	9,77
115	пласт – 12 упр. – пласт. нагруж. – шейка	1,24	8,66	7,65	1,53
203	пласт – 21 ст. упр. пл. нагр. – 4 ст. упр. пл. нагр. на уч-ке неуст. полз.	9,86	67,50	47,42	11,84
204	пласт – 17 ст. упр. пл. нагр. – разрушение	6,86	45,69	37,80	8,39
206	пласт – 21 ст. упр. пл. нагр. – разрушение	6,69	46,18	32,19	7,93
210	пласт – 20 ст. упр.пл. – шейка	6,35	41,95	34,28	7,82

Таблица 2.3 (продолжение)

211	пласт – 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	1,88	13,20	11,14	2,29
212	пласт – 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики)	1,61	13,91	9,76	2,05
104	полз – 2 ст. упр. пласт. нагр. – 10 ст. на полз. – разрушение	1,28	8,87	7,89	1,57
105	полз – 2 ст. упр. пласт. нагр. – 6 ст. на полз. – разрушение	5,35	41,67	27,19	6,81
106	полз – 2 ст. упр. пласт. нагр. – 10 ст. на полз. – разрушение	1,20	10,65	7,88	1,50
107	полз – 2 ст. упр. пласт. нагр. – 4 ст. на полз. – разрушение	5,48	38,22	24,83	6,49
109	полз – 2 ст. упр. пласт. нагр. – 8 ст. на полз. – разрушение	1,46	11,97	9,31	1,79
117	полз – 0-е нагр. – полз. – шейка	3,81	37,90	25,44	4,81
119	полз – 0-е нагр. – 1 упр. пл. нагр. – 5 нагр на полз. - шейка	4,84	35,43	24,26	5,81
121	полз – 3 пл. – 5 полз. - шейка	1,84	17,09	10,22	2,35
122	полз – 3 пл. – 5 полз. - разрушение	5,87	48,50	42,12	8,35
123	полз – 2 пл. – 7 полз. - разрушение	4,68	41,91	24,06	5,72
124	полз – 2 пл. – 4 полз. - разрушение	3,37	23,74	17,97	4,26
201	полз – 4 ст. упр. пласт. нагр. – 10 ст. на полз. – разрушение	10,27	60,80	48,18	12,40
202	полз – 3 ст. упр. пласт. нагр. – 11 ст. на полз. – разрушение	8,85	81,22	44,38	10,86
205	полз – 3 пл. – 12 полз. – разрушение	5,79	37,21	31,16	7,17
207	полз – 2 ст. упр. пл. нагр. – 15 ст. на полз. - разрушение	7,46	49,01	38,49	8,86

Данная таблица в целом подтверждает результаты, полученные при визуальном анализе. Так, величина R_a для образцов, вырезанных вдоль, изменяется от 1 до 6 мкм. Для образцов, вырезанных поперек заготовки, значение R_a дости-

гает 9-10 мкм для обоих режимов испытаний. Аналогичные результаты наблюдаются для величины среднего квадратичного отклонения профиля R_q .

Рассмотрим влияние обоих видов испытаний на величину микротвердости. В связи с упомянутой ранее неровностью рельефа во всех исследованных образцах наблюдается достаточно большой разброс значений микротвердости.

На рис. 2.18 приведены графики микротвердости для неразрушенных образцов. Выявлен значительный рост микротвердости (в 2-3 раза) в области образования шейки. Это вызвано тем, что локализация пластической деформации в этой зоне приводит к максимальной степени наклепа. Ширина зоны упрочнения для образца № 117 составляет примерно 8 мм, для образца № 119 – 12 мм.

В результате измерений обнаружено, что значения микротвердости заметнее увеличиваются на образцах, подвергнутых испытаниям на ползучесть (рис. 2.19). Длина зоны упрочнения (в области разрушения) равна 2-5 мм. Максимальное значение микротвердости в зоне разрушения наблюдается на образце №106 с программой испытаний: 2 ст. упр. пласт. нагр. – 10 ст. на полз. и образце №201 с программой испытаний: 4 ст. упр. пласт. нагр. – 10 ст. на полз.

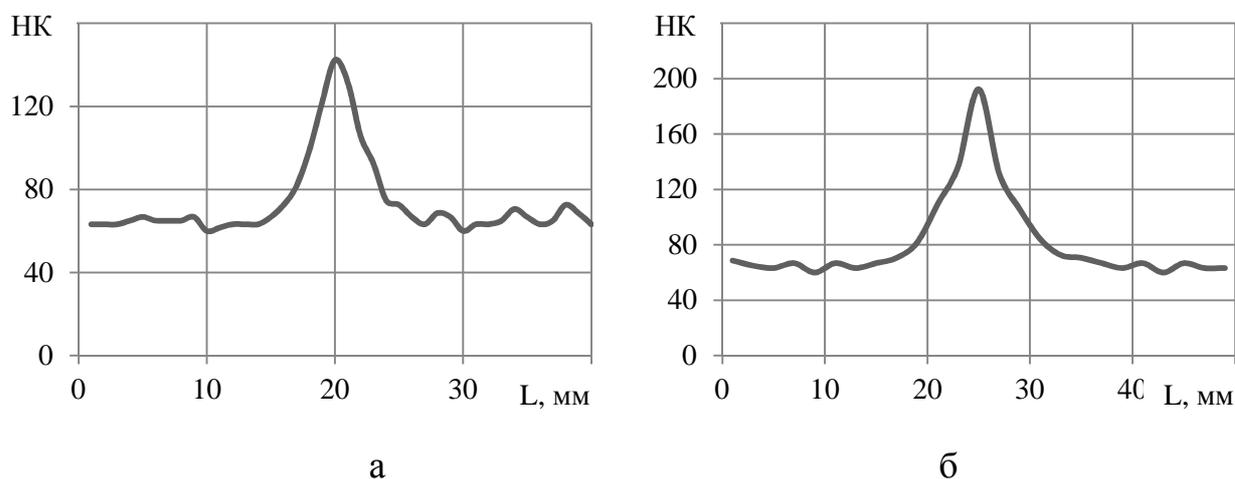


Рис. 2.18. Графики изменения микротвердости неразрушенных образцов:
а – №117, б – №119

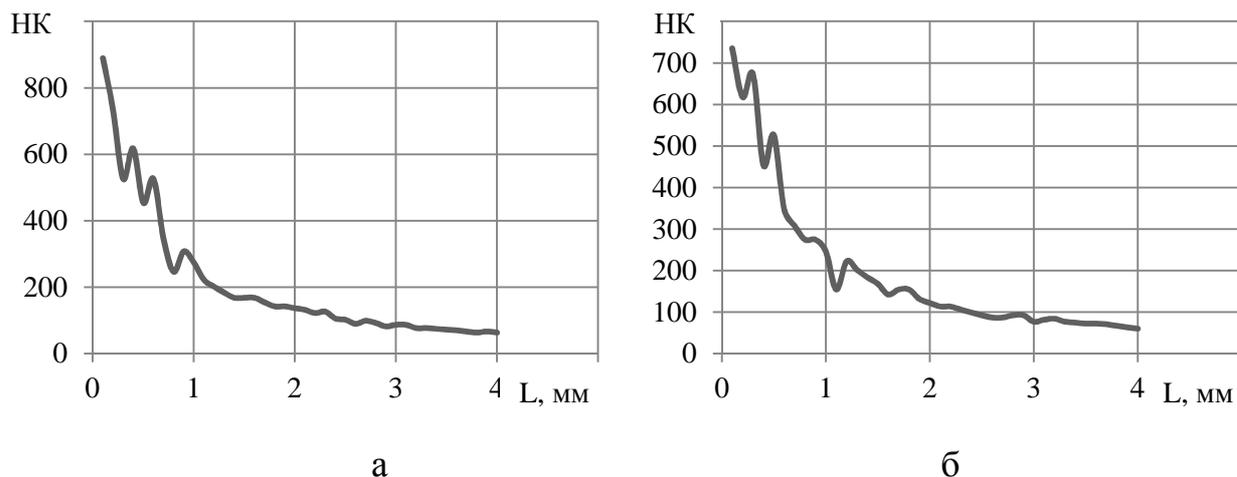


Рис. 2.19. Распределение микротвердости от зоны разрушения на образцах после испытаний на ползучесть: а – №121, б – №124

Образцы, испытанные на пластичность, имеют более низкое значение микротвердости в области разрушения (рис. 2.20). Для данных образцов характерно «ступенчатое» снижение микротвердости. Ширина каждой «ступени» составляет примерно 200-400 мкм. Такая картина объясняется, по-видимому, режимом упругопластических испытаний, которые проводились в несколько этапов с разгрузкой между этапами.

Образцы № 111, 112, 113, 114 имеют одинаковую программу испытаний: 5 кратн. (продольн.), диагр. упр. пласт. деформ. (без статистики). Графики изменения микротвердости для данных образцов практически идентичны.

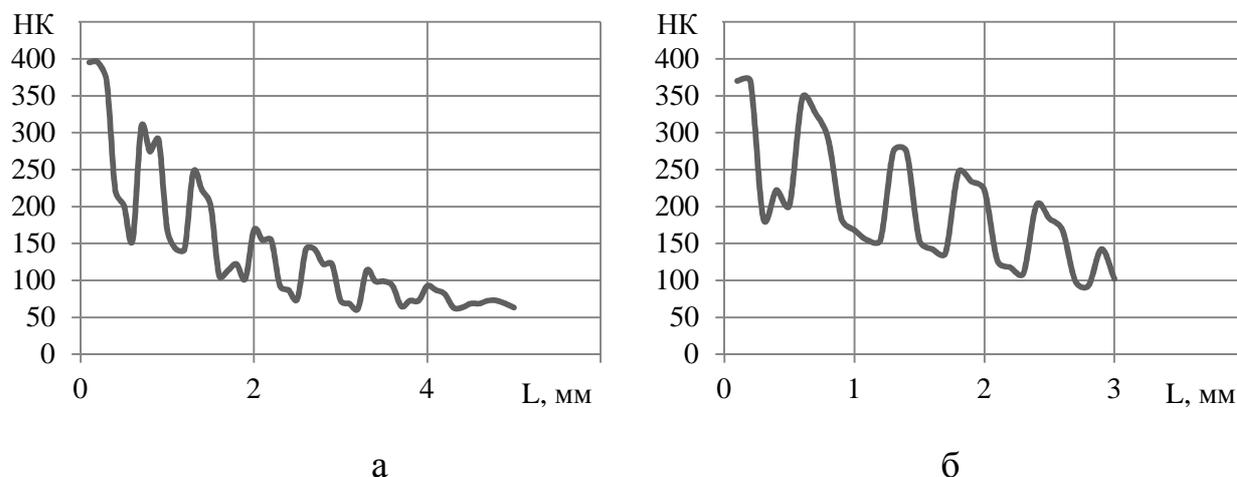


Рис. 2.20. Распределение микротвердости от зоны разрушения на образцах после испытаний на пластичность: а – №101, б – №112

Проведенные экспериментальные исследования по макроструктурному анализу, измерению шероховатости и микротвердости поверхностного слоя также позволяют сделать вывод о различных механизмах образования деформаций пластичности и ползучести, а в совокупности с исследованием стохастических полей деформаций ползучести и пластичности с точки зрения корреляционного статистического анализа, выполненного в [30, 99], гипотезу о независимом друг от друга развитии реологических деформаций можно считать соответствующей действительности. Поэтому в дальнейшем будем считать, что предварительная пластическая деформация не влияет на формирование стохастического поля деформации ползучести. Это предположение является основополагающим при построении стохастической феноменологической модели ползучести поверхностно упрочненных цилиндрических изделий (пункт. 2.3, раздел 3).

2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА АД1

Аналізу подвергались образцы из технически чистого алюминия АД1, вырезанные из поверхностного слоя прутков после прессования. Образцы имели вытянутую форму с зажимами для последующего растяжения (рис. 2.21). Для удобства дальнейшего изложения результатов исследования на рис. 2.21 была введена система координат: ось x направлена вдоль оси образца, ось y – поперек.



Рис. 2.21. Внешний вид исследуемых образцов

Для исследования полей деформации на образцы, рабочая длина которых составляла 100 мм, была нанесена сетка с шагом 2,5 мм (вдоль образца – 40 ячеек, поперек – 8). Образцы подвергались статическому растяжению на разрывной машине на различную величину пластической деформации ступенями до величины накопленной деформации 3%, и далее проводилась разгрузка образца. Всего было проведено 4 ступени растяжений. После каждой ступени на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц определялось изменение геометрии ячейки в продольном и поперечном направлениях в центральных и периферийных областях.

Результаты. На рис. 2.22 (а-д) представлены фотографии ячеек в исходном состоянии и после проведения каждой ступени нагружения (образец фотографировался в центральной зоне). Фотографии ячеек приведены в системе координат (рис. 2.22 (е)), соответствующей системе координат на рис. 2.21. По данным проведенных анализов построены графики полей деформации, которые представлены на рис. 2.23, 2.24.

Имеющиеся экспериментальные данные позволяют сформулировать следующие выводы. Во-первых, на рис. 2.23, 2.24 можно наблюдать существенное количество выбросов и отклонений от общего тренда графика. Этот факт подтверждает предположение о стохастической природе реологических деформаций плоских образцов. Во-вторых, на рис. 2.23 (б, в, г), 2.24 (б, в, г) обращает на себя внимание неоднородное распределение деформации ползучести по пространственной переменной. Значения деформации ползучести в центральной части образца существенно выше, чем на его краях. Это утверждение справедливо как для продольной деформации, так и для поперечной.

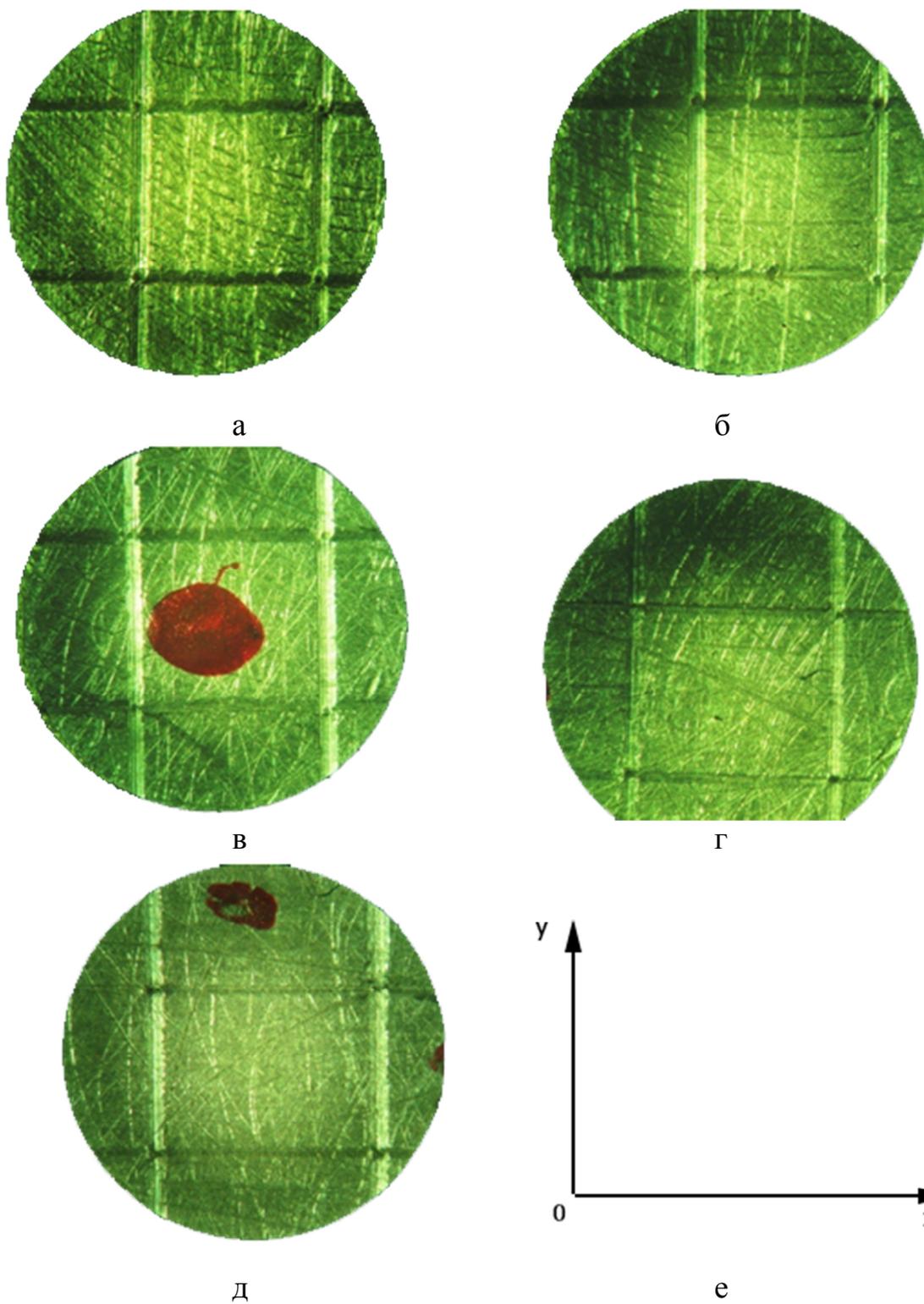
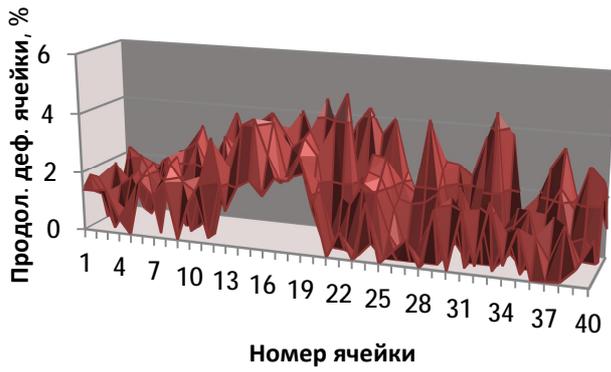
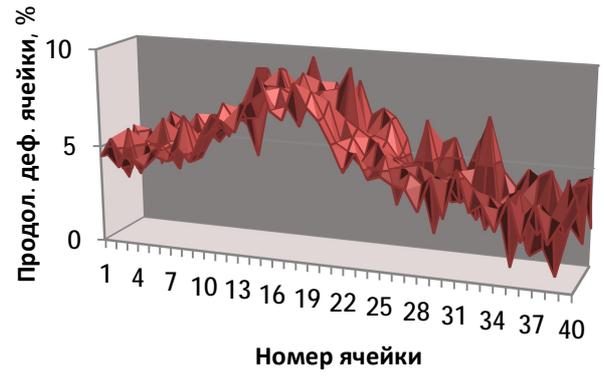


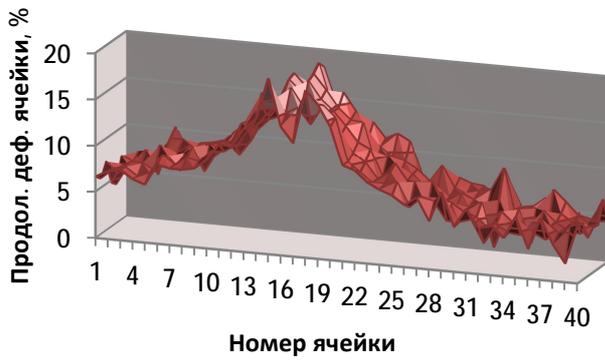
Рис. 2.22. Изменение габаритов ячейки после различных ступеней нагружения:
 а – исходное состояние, б – ступень №1, в – ступень №2, г – ступень №3,
 д – ступень №4, е – направление осей координат. х32



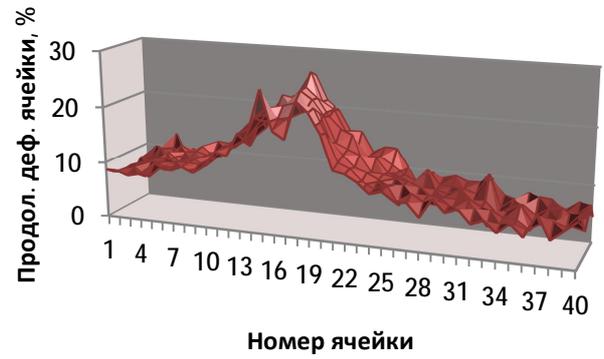
а



б

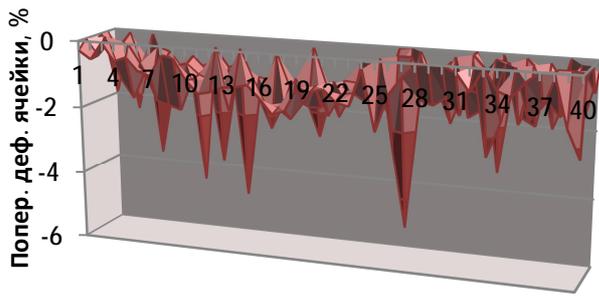


в



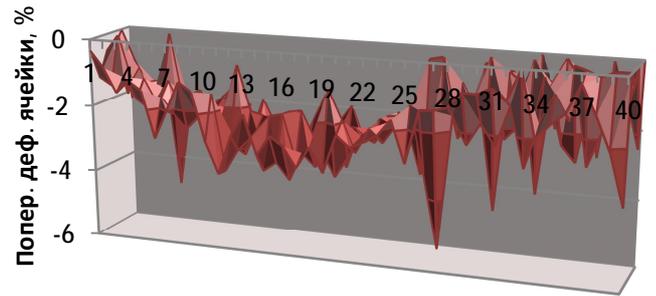
г

Рис. 2.23. Распределение деформации в продольном направлении: а – деформация после ступени №1, б – деформация после ступени №2, в – деформация после ступени №3, г – деформация после ступени №4



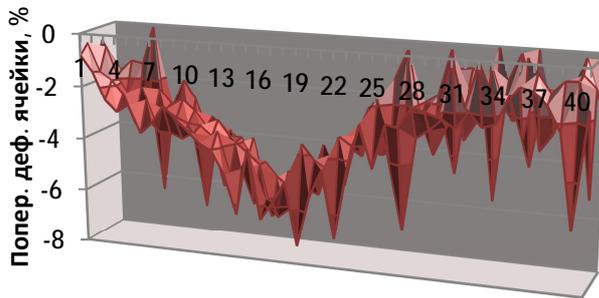
Номер ячейки

а



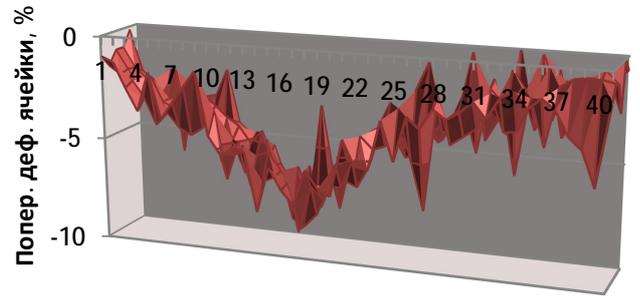
Номер ячейки

б



Номер ячейки

в



Номер ячейки

г

Рис. 2.24. Распределение деформации в поперечном направлении: а – деформация после ступени №1, б – деформация после ступени №2, в – деформация после ступени №3, г – деформация после ступени №4

2.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В ПОЛЫХ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ИЗ СПЛАВА Д16Т В УСЛОВИЯХ ОСЕВОГО РАСТЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $T = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$

В разделе 1 указано, что в научной литературе слабо освещен вопрос о влиянии температурно-силовых режимов на релаксацию остаточных напряжений в упрочненных деталях. Как правило, этот вопрос сводится к экспериментальным исследованиям в области термоэкспозиции для таких простейших элементов конструкций, как плоские призматические объекты и объекты круговой цилиндрической формы. Из-за трудностей с теоретическим описанием и проведением экспериментов в условиях повышенных температур в научной литературе в данный момент представлено крайне мало сведений об исследовании поверхностно упрочненных цилиндрических образцов (гладких и с концентраторами напряжений) при растягивающих нагрузках при ползучести. Проведение подобных экспериментальных исследований является трудоемким процессом, состоящим из изготовления и упрочнения образцов, метрологической настройки испытательных машин, выбора средств измерений деформации ползучести, методики эксперимента и т.д. Вместе с тем, подобные испытания являются неотъемлемой частью проверки адекватности разработанных методик оценки кинетики остаточных напряжений в упрочненном слое вследствие ползучести.

В предыдущем пункте установлено крайне неоднородное распределение деформации ползучести по пространственной переменной. Очевидно, что эта неоднородность деформации ползучести приведет и к разбросу сформировавшихся после упрочнения остаточных напряжений. В связи с этим задача данного пункта заключалась в экспериментальном исследовании распределения ло-

кальных полей деформации ползучести по пространственно-временным координатам в полых поверхностно упрочнённых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при температуре $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Как известно, упрочненный слой достаточно тонок и не оказывает влияния на жесткость образца. По этой причине, а также в связи с технической сложностью и длительностью испытаний на ползучесть, исследования на ползучесть цилиндрических образцов проводились уже в состоянии упрочнения. Стоит ожидать, что среднеинтегральная деформация ползучести упрочненного и неупрочненного образцов в осевом направлении будет практически одинакова. Кроме этого, здесь использовалась обоснованная в пункте 2.1 гипотеза о том, что деформации пластичности и ползучести развиваются независимо друг от друга. Поэтому пластические деформации, полученные в тонком упрочненном слое, не оказывают влияния на образование и развитие деформаций ползучести в упрочненном растягиваемом образце.

Отметим, что экспериментальные исследования, о которых пойдет речь ниже, опубликованы в диссертации В.В. Лунина [53] и в статье [102], соавторами которой являются и автор данной диссертационной работы, и В.В. Лунин, принимавшие участие как в разработке методики и проведении экспериментальных исследований, так и в обработке и интерпретации полученных опытных данных. При этом автор диссертации [53] использовал экспериментальные данные для оценки степени релаксации остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т при осевой нагрузке и выработке некоторых рекомендаций по применимости метода колец и полосок для экспериментального определения остаточных напряжений в процессе их существенной релаксации. В свою очередь, автором настоящей диссертации экспериментальные данные были обработаны в статистической постановке и использованы для построения стохастической модели ползучести сплава Д16Т при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее дальнейшего использования для решения стохастической краевой задачи оценки напряженно-деформированного состояния упрочненных полых образцов в

процессе их ползучести. В связи с вышеизложенным для лучшего понимания последующих теоретических исследований кратко опишем методику экспериментальных исследований, которая в расширенном варианте приведена в [102] и диссертации [53].

Исследованию подвергались цилиндрические образцы диаметром 15 мм с отверстием диаметром 5 мм, изготовленные из алюминиевого сплава Д16Т (рис. 2.25). Механические характеристики сплава Д16Т при нормальной температуре приведены в таблице 2.4.

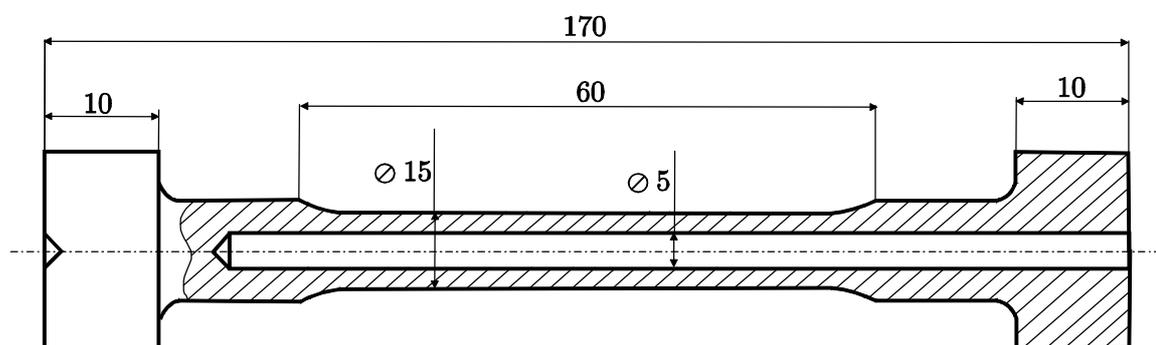


Рис. 2.25. Эскиз образца для испытаний на ползучесть [53, 102]

Таблица 2.4

Механические характеристики сплава Д16Т при нормальной температуре

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
Д16Т	451	618	11,9	13,3	684

Для деформируемых алюминиевых сплавов, начиная с 1970 года, используется четырехзначная цифровая маркировка. Цифры означают следующее:

- первая цифра – основа сплава, и для алюминия используется цифра 1;
- вторая цифра – система легирования сплава: 1 – система Al-Cu-Mg; 2 – Al-Cu; 3 – Al-Mg-Si; 4 – Al-Li; 5 – Al-Mg; 9 – Al-Zn-Mg-Cu; цифры 6, 7 и 8 – резервные; 0 – спеченные алюминиевые сплавы;
- последние две цифры – порядковый номер сплава.

В связи с этим дюралюмин Д16 обозначается 1160. Но в практике чаще используется «старая» буквенно-цифровая маркировка, которая и применялась

для этого сплава в настоящей диссертации. Буква «Т» в сплаве Д16Т указывает режим термообработки, который состоит из закалки и естественного старения.

Образцы были упрочнены на пневмодробеструйной установке. Для упрочнения использовались стальные шарики диаметром 1,5 – 2,5 мм. Упрочнение производилось в течение 10 мин при давлении воздуха $P = 0,20$ МПа.

Опишем установку для испытаний на ползучесть указанных выше образцов. Согласно [53, 102]:

«Для проведения испытаний на ползучесть была изготовлена специальная установка, схема которой приведена на рис. 2.26. На станине 1 закреплено коромысло 6, соотношение плеч которого $l_1/l_2 = 41,486$. На конце большого плеча крепится расчетная нагрузка 5, на конце малого – устанавливается образец 2. Чтобы обеспечить соосность прикладываемой нагрузки, прикладываемой к образцу, используется стальной шарик, с помощью которого обеспечивается крепление нижнего конца образца к станине. Для нагрева используется печь 3, внутрь которой помещается образец. Температура в рабочей зоне образца регистрируется термосопротивлением; для поддержания температуры используется блок терморегулирования 4».

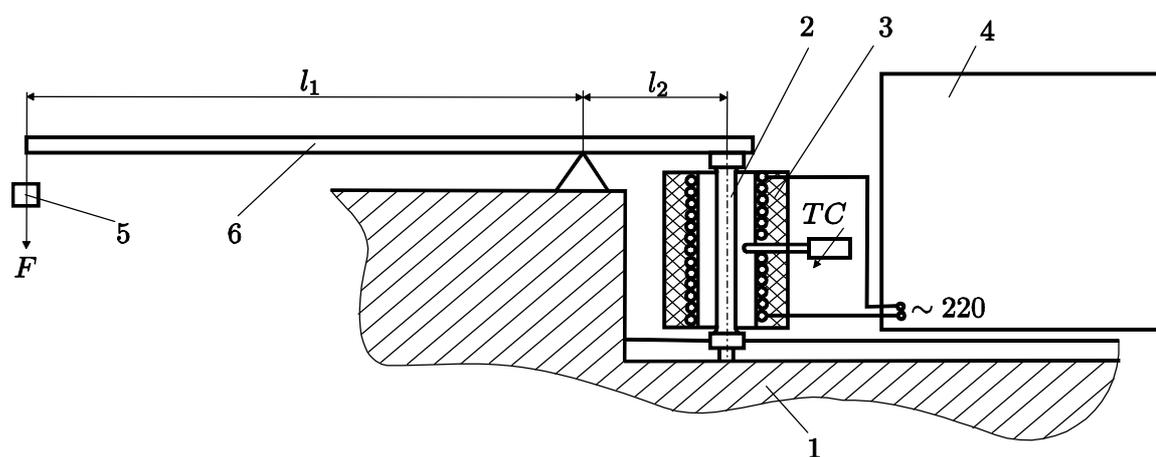


Рис. 2.26. Схема установки для испытаний на ползучесть: 1 – основание, 2 – образец, 3 – печь, 4 – блок терморегулирования, 5 – нагрузка, 6 – коромысло

[53, 102]

Как уже отмечено в предыдущих пунктах, деформация ползучести имеет существенный разброс как для различных испытываемых образцов в одинаковых условиях испытаний, так и в пределах одного образца по пространственной координате. Перед началом испытаний, чтобы определить разброс деформации ползучести по длине образца, на его рабочей части вдоль образующей наносились метки (производилось кернение), по которым затем измеряли длины участков перед испытаниями и в процессе испытаний через различные промежутки времени. Метки были пронумерованы цифрами 1, 2, ..., 10. Схема расположения меток (через примерно одинаковое расстояние) приведена на рис. 2.27. В процессе исследования измерялись длины участков между следующими метками: 1 – 2, 1 – 3, ..., 1 – 10 в определенные моменты времени. В эти моменты снималась нагрузка, образец охлаждался, и на инструментальном микроскопе УИМ-23 осуществлялось измерение длины каждого участка. Далее образец снова помещался в испытательную машину, нагревался до $T = 125$ °С, к нему прикладывалась нагрузка, и процесс ползучести продолжался. Подобная схема испытаний не приводит к погрешностям, поскольку деформация ползучести сплава Д16Т полностью необратима и при разгрузках наблюдается только упругая деформация (отсутствует обратная ползучесть). По описанной программе было исследовано 4 образца при различных значениях осевых напряжений. Рабочая область образцов №1 – 3 была разбита на девять участков, образца №4 – на семь. Растягивающее напряжение при испытании на ползучесть образца №1 составляло $\sigma_z = 353$ МПа, образца №2 – $\sigma_z = 385$ МПа, образца №3 – $\sigma_z = 406,2$ МПа, образца №4 – $\sigma_z = 420$ МПа. Длительность испытаний образца №1 равнялась 100 часам, образца №2 – 162 часам, образца №3 – 166 часам, образца №4 – 83 часам.

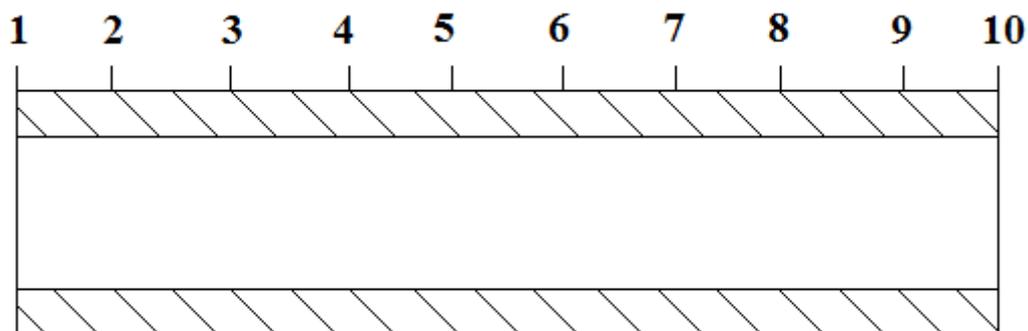


Рис. 2.27. Схема измерения локальной деформации на рабочей части полого цилиндрического образца

Результаты замеров участков 1-2, 1-3, ..., 1-10 приведены в диссертации [53]. Именно такая схема замера была связана со следующими соображениями: измерение, например, удлинений между двумя соседними метками, во-первых, имеет определенную погрешность, а во-вторых, в связи с возникающей на каждом участке $[i, i+1]$ погрешностью сумма всех погрешностей не давала бы в точности значение среднеинтегрального удлинения 1-10, и в-третьих, измерение удлинений «отрезков» с увеличивающейся длиной дает меньшую погрешность, чем измерение удлинений по малой базе. Отметим, что замер между участками 1-10 давал значение средней деформации ползучести всего образца, т.е. по базе в 60 мм (см. рис. 2.25). Поскольку задача данной работы заключалась в исследовании деформаций участков между соседними метками, в таблице 2.5 представлены результаты замера длин именно этих участков, подсчитанные на основе замеров между метками 1 – 2, 1 – 3, ..., 1 – 10. При таком подходе замера удлинений между соседними участками автоматически сумма всех участков $[i, i+1]$ ($i = \overline{1,9}$) дает суммарное среднеинтегральное удлинение участка 1-10.

В таблице 2.6 представлены вычисленные значения абсолютных удлинений участков. Используя таблицы 2.5 и 2.6, были посчитаны деформации ползучести p каждого участка по следующей формуле:

$$p = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где Δl – абсолютное удлинение участка, l_0 – первоначальная длина участка (перед испытаниями на ползучесть при $t = 0$). Подсчитанные значения деформации ползучести приведены в таблице 2.7.

Среднеинтегральные (по всей рабочей части образца) экспериментальные значения деформации ползучести образцов №1 – 4 при осевых напряжениях $\sigma_z = 353, 385, 406,2$ и 420 МПа соответственно представлены на рис. 2.28. На основе таблицы 2.9 получены экспериментальные кривые ползучести участков образцов из сплава Д16Т при $T = 125$ °С, которые приведены на рис. 2.29 – 2.32.

Таблица 2.5

Данные измерения длин участков образцов из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в процессе ползучести

№ образца	Время испыт., час	Длины участков образцов, мм								
		l_{1-2}	l_{2-3}	l_{3-4}	l_{4-5}	l_{5-6}	l_{6-7}	l_{7-8}	l_{8-9}	l_{9-10}
1	0	3,972	10,577	17,690	24,025	32,546	40,507	50,815	56,928	64,383
	24	3,992	10,643	17,785	24,165	32,729	40,726	51,090	57,214	64,684
	48	3,994	10,645	17,790	24,175	32,743	40,745	51,118	57,245	64,716
	72	3,995	10,647	17,795	24,182	32,750	40,753	51,130	57,257	64,733
	100	3,999	10,654	17,806	24,194	32,769	40,773	51,151	57,281	64,762
2	0	7,271	15,992	21,137	28,512	34,110	40,120	47,695	55,340	62,842
	9	7,357	16,160	21,368	28,761	34,412	40,484	48,142	55,866	63,546
	25	7,368	16,182	21,394	28,834	34,489	40,563	48,221	55,968	63,724
	50	7,379	16,197	21,411	28,853	34,512	40,586	48,251	55,999	63,778
	75	7,388	16,208	21,456	28,900	34,573	40,653	48,319	56,073	63,854
	100									63,813
	162	7,404	16,229	21,526	28,973	34,647	40,743	48,415	56,183	63,965
3	0	7,634	12,807	16,314	23,395	31,984	41,397	48,435	56,785	63,051
	5	7,685	12,892	16,408	23,639	32,434	42,080	49,312	57,883	64,307
	8	7,694	12,912	16,431	23,668	32,468	42,153	49,397	57,994	64,461
	25	7,697	12,916	16,472	23,719	32,534	42,255	49,501	58,100	64,584
	50	7,704	12,924	16,486	23,737	32,559	42,289	49,536	58,141	64,635
	75	7,710	12,931	16,497	23,752	32,580	42,314	49,561	58,188	64,685

Таблица 2.5 (продолжение)

	166	7,715	12,940	16,529	23,786	32,622	42,361	49,629	58,258	64,760
4	0	9,412	16,727	26,582	38,126	48,377	58,550	68,022		
	2	9,567	17,069	27,159	38,996	49,500	59,957	69,719		
	5	9,650	17,155	27,263	39,101	49,627	60,092	69,858		
	9	9,657	17,192	27,370	39,265	49,813	60,380	70,186		
	12	9,721	17,267	27,445	39,352	49,911	60,486	70,310		
	30	9,725	17,278	27,467	39,403	49,977	60,557	70,382		
	58	9,738	17,295	27,487	39,425	50,002	60,585	70,420		
	83	9,742	17,305	27,500	39,507	50,086	60,685	70,537		

Таблица 2.6

Экспериментальные значения абсолютных удлинений участков образцов из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в процессе ползучести

№ образца	Время испыт., час	Абсолютные удлинения участков образцов, мм								
		Δl_{1-2}	Δl_{2-3}	Δl_{3-4}	Δl_{4-5}	Δl_{5-6}	Δl_{6-7}	Δl_{7-8}	Δl_{8-9}	Δl_{9-10}
1	0	3,972	6,605	7,113	6,335	8,522	7,961	10,308	6,113	7,454
	24	3,992	6,650	7,143	6,380	8,564	7,997	10,364	6,124	7,470
	48	3,994	6,651	7,146	6,385	8,567	8,002	10,374	6,127	7,471
	72	3,995	6,652	7,149	6,387	8,568	8,003	10,377	6,127	7,476
	100	3,999	6,655	7,152	6,388	8,576	8,004	10,378	6,130	7,481
2	0	7,271	8,721	5,145	7,375	5,598	6,010	7,575	7,645	7,502

Таблица 2.6 (продолжение)

	9	7,357	8,803	5,208	7,392	5,652	6,072	7,658	7,724	7,679
	25	7,368	8,814	5,212	7,440	5,655	6,074	7,658	7,747	7,755
	50	7,379	8,818	5,214	7,442	5,659	6,074	7,665	7,748	7,779
	75	7,388	8,820	5,248	7,444	5,673	6,080	7,666	7,754	7,781
	100									
	162	7,404	8,825	5,297	7,447	5,674	6,095	7,672	7,769	7,782
3	0	7,634	5,173	3,506	7,081	8,589	9,413	7,038	8,350	6,266
	5	7,685	5,207	3,516	7,231	8,795	9,646	7,233	8,570	6,424
	8	7,694	5,218	3,518	7,238	8,799	9,685	7,244	8,597	6,467
	25	7,697	5,219	3,556	7,247	8,815	9,721	7,246	8,599	6,484
	50	7,704	5,220	3,563	7,251	8,822	9,730	7,246	8,606	6,494
	75	7,710	5,221	3,566	7,255	8,828	9,734	7,247	8,628	6,497
	166	7,715	5,226	3,589	7,258	8,836	9,739	7,268	8,629	6,501
4	0	9,412	7,315	9,855	11,544	10,251	10,173	9,472		
	2	9,567	7,503	10,090	11,837	10,504	10,457	9,763		
	5	9,650	7,505	10,107	11,838	10,527	10,465	9,766		
	9	9,657	7,535	10,178	11,895	10,548	10,568	9,805		
	12	9,721	7,546	10,178	11,906	10,560	10,575	9,824		
	30	9,725	7,553	10,189	11,937	10,574	10,580	9,824		
	58	9,738	7,556	10,193	11,938	10,577	10,583	9,835		
	83	9,742	7,563	10,195	12,006	10,579	10,599	9,852		

Таблица 2.7

Экспериментальные значения деформации ползучести участков образцов из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в процессе ползучести

№ образца	Время испыт., час	Деформация ползучести участков образцов								
		p1-2	p2-3	p3-4	p4-5	p5-6	p6-7	p7-8	p8-9	p9-10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0,005085	0,006904	0,004119	0,007104	0,004964	0,00451	0,005452	0,00175	0,00216
	48	0,005387	0,00701	0,004541	0,00802	0,005328	0,005163	0,006384	0,002225	0,002267
	72	0,005815	0,007116	0,004948	0,008225	0,005421	0,005288	0,006723	0,002241	0,002911
	100	0,006772	0,007555	0,005497	0,008398	0,006325	0,005401	0,006791	0,002764	0,003595
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0,011828	0,009483	0,012225	0,002346	0,009557	0,010316	0,010997	0,010334	0,023647
	25	0,013382	0,010676	0,013042	0,008827	0,01011	0,010632	0,010997	0,013395	0,033751
	50	0,014909	0,011157	0,013353	0,009139	0,010789	0,010682	0,011895	0,01346	0,036884
	75	0,016078	0,01141	0,01998	0,00941	0,013379	0,01158	0,012014	0,014297	0,037177
	100	0,017185	0,011662	0,024781	0,00962	0,013469	0,012861	0,012449	0,015239	0,037231
	162	0,018292	0,011914	0,029582	0,009831	0,013558	0,014143	0,012885	0,016181	0,037284
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0,006615	0,006534	0,002881	0,021169	0,024019	0,024711	0,027665	0,026395	0,025151
	8	0,007859	0,008738	0,003394	0,022129	0,024496	0,028939	0,029284	0,029605	0,031997
	25	0,008147	0,00895	0,014203	0,023429	0,026324	0,032742	0,029554	0,029832	0,034758
	50	0,00913	0,009028	0,016114	0,023965	0,027104	0,033709	0,029597	0,030617	0,036362

Таблица 2.7 (продолжение)

	75	0,009929	0,009318	0,017026	0,024488	0,02785	0,034091	0,029682	0,033246	0,036817
	166	0,010505	0,010188	0,023472	0,024911	0,028699	0,034633	0,032723	0,033449	0,037535
4	0	0	0	0	0	0	0	0		
	2	0,016404	0,025618	0,023898	0,025347	0,024661	0,027907	0,030647		
	5	0,025265	0,026001	0,025653	0,025468	0,026895	0,028664	0,030953		
	9	0,025998	0,030075	0,032838	0,030379	0,028963	0,038779	0,035134		
	12	0,03284	0,031538	0,032858	0,031376	0,030104	0,039506	0,037129		
	30	0,033276	0,032481	0,033903	0,034	0,031529	0,039988	0,03715		
	58	0,034657	0,032959	0,034299	0,034122	0,031802	0,040243	0,038332		
	83	0,035072	0,033875	0,034543	0,040055	0,032026	0,041905	0,040064		

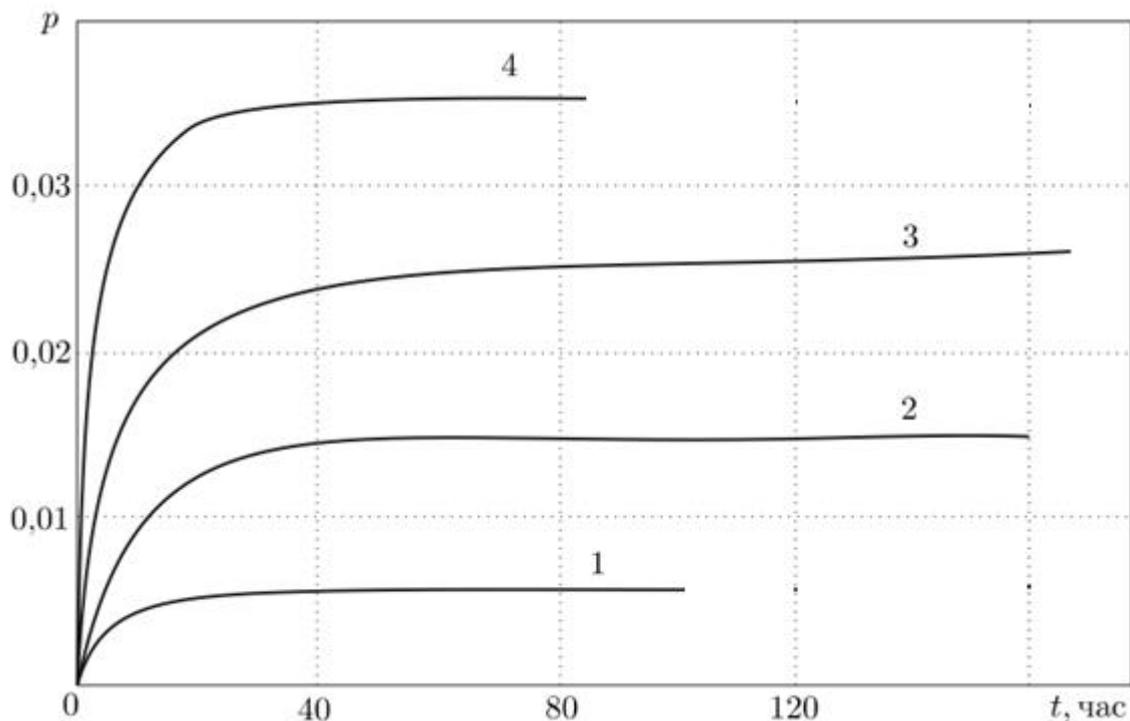


Рис. 2.28. Среднеинтегральные экспериментальные кривые ползучести сплава Д16Т при $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ в условиях осевого растяжения. Цифры 1 – $\sigma_z = 353 \text{ МПа}$; 2 – $\sigma_z = 385 \text{ МПа}$; 3 – $\sigma_z = 406,2 \text{ МПа}$; 4 – $\sigma_z = 420 \text{ МПа}$

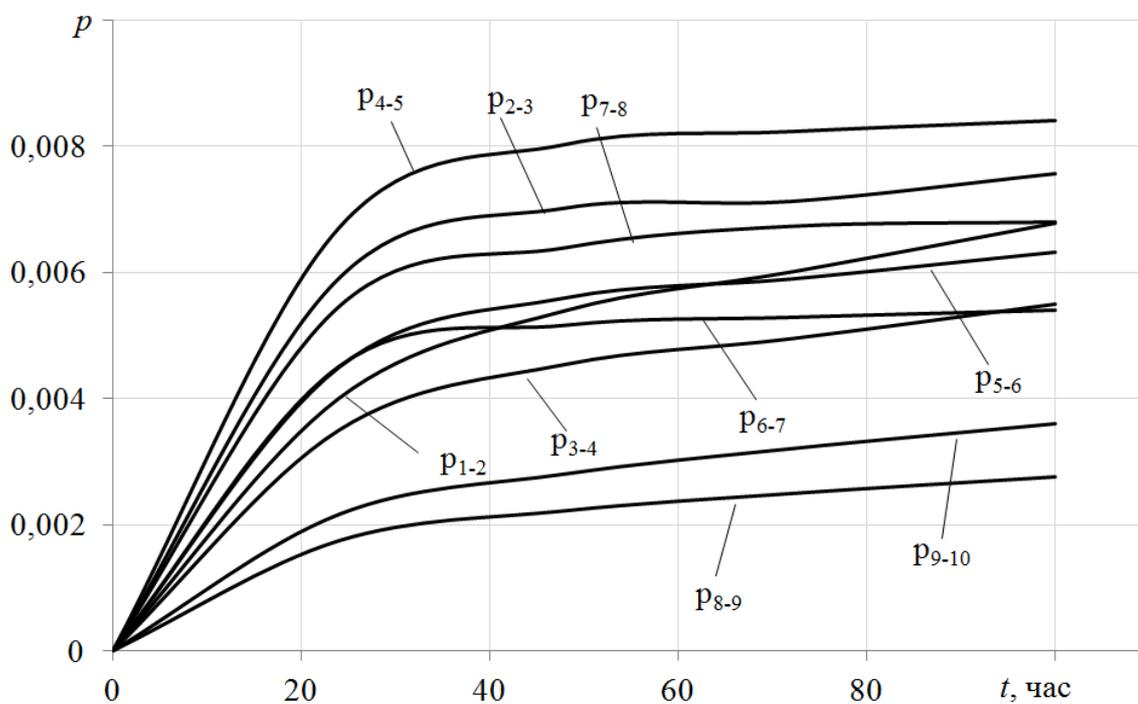


Рис. 2.29. Кривые ползучести участков образца №1 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 353 \text{ МПа}$

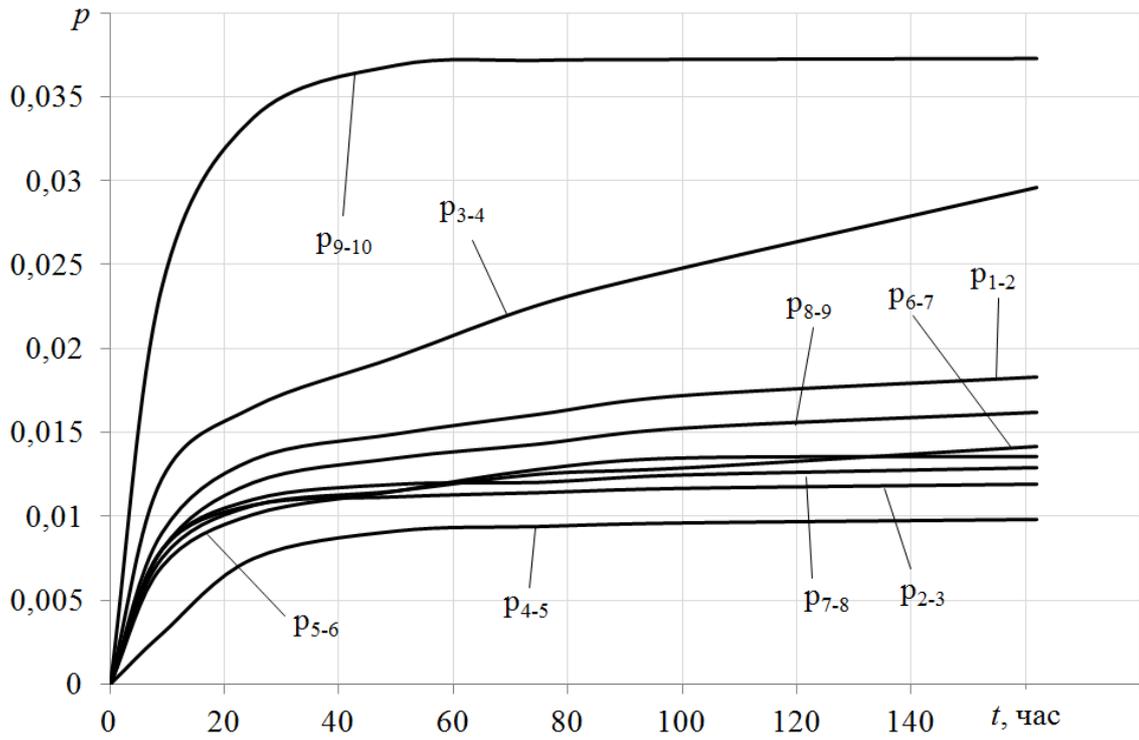


Рис. 2.30. Кривые ползучести участков образца №2 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 385$ МПа

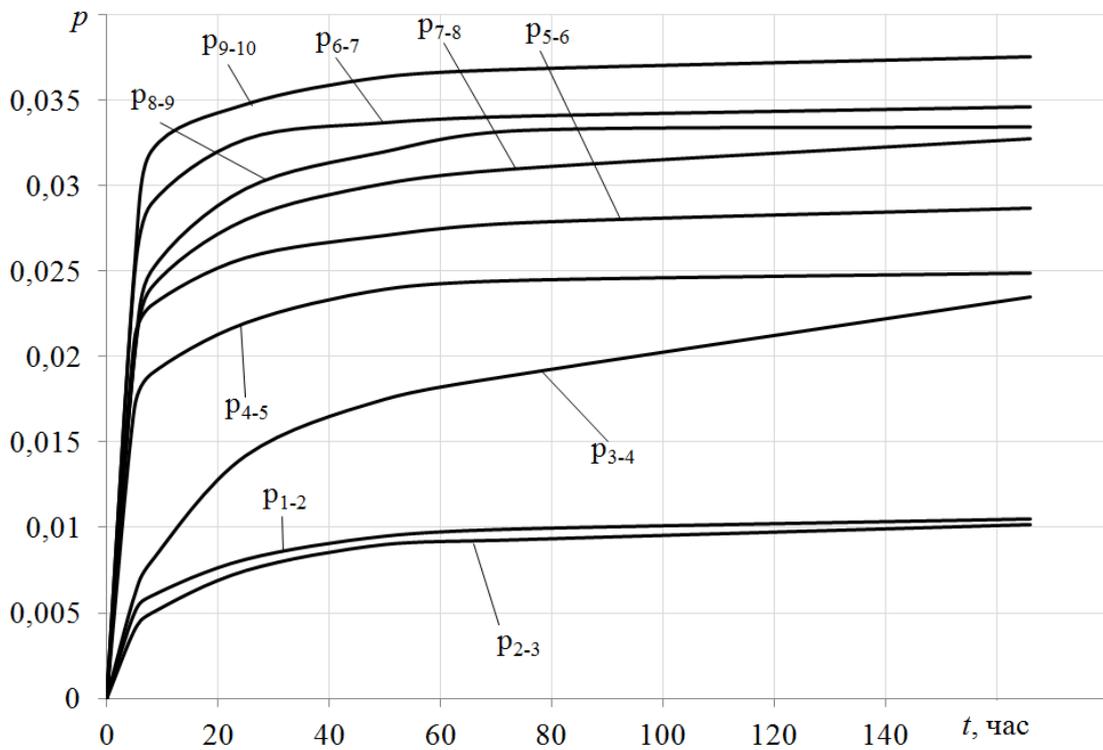


Рис. 2.31. Кривые ползучести участков образца №3 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 406,2$ МПа

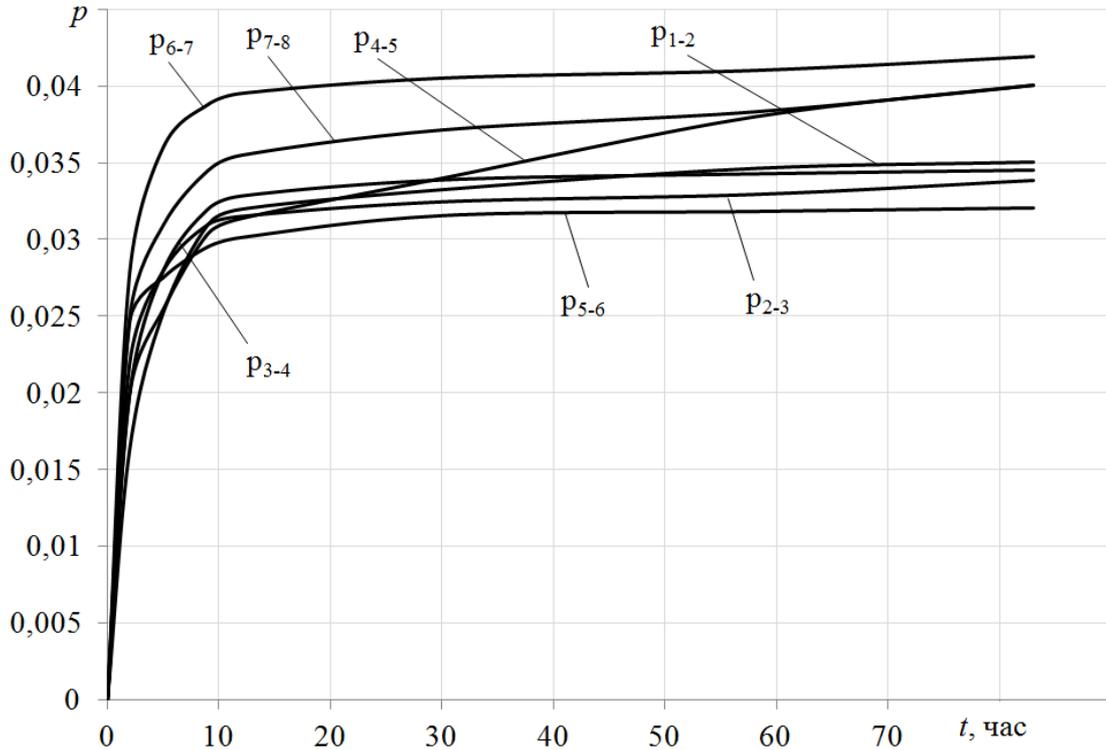


Рис. 2.32. Кривые ползучести участков образца №4 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 420$ МПа

Анализ данных, приведенных на рис. 2.29-2.32, свидетельствует о стохастическом характере деформации ползучести в исследованных образцах из сплава Д16Т при $T = 125^\circ\text{C}$. При этом отмечается крайне неоднородное ее распределение по длине образцов (по пространственной координате). Есть участки, существенно «склонные» к деформированию, а некоторые участки «слабо» деформируются. Так, на рис. 2.29 деформация ползучести участка 8-9 ($p_{8,9}$) почти в 4 раза меньше, чем деформация участка 4-5 ($p_{4,5}$). Аналогичные результаты можно наблюдать и на рис. 2.30 и 2.31, соответствующим растягивающей нагрузке в 385 МПа и 406,2 МПа. Например, на рис. 2.30 деформация на участке 4-5 ($p_{4,5}$) более чем в 3,5 раза меньше деформации ползучести на участке 9-10 ($p_{9,10}$), а на рис. 2.31 деформация ползучести на участке 2-3 ($p_{2,3}$) почти в 4 раза меньше, чем деформация на участке 9-10 ($p_{9,10}$). И лишь для растягивающей нагрузки в 420 МПа разброс деформации ползучести по пространственной координате менее значителен, чем при других напряжениях (см. рис. 2.32).

Обобщая проведенные в данной главе исследования, можно сделать следующие выводы:

1) установлена стохастическая природа реологических деформаций для каждого анализируемого случая: цилиндрические образцы из сплава АД1, плоские образцы из сплава АД1, полые поверхностно упрочненные цилиндрические образцы из сплава Д16Т;

2) комплексные исследования по непосредственному замеру локальных деформаций пластичности и ползучести по пространственной координате для цилиндрических образцов из сплава АД1, совмещенные с анализом «качества» поверхностного слоя деформируемых образцов по параметрам шероховатости и микротвердости, позволили установить, что развитие деформаций пластичности и ползучести идет независимо для каждой из этих компонент реологической деформации. Это, во-первых, позволяет строить физические уравнения состояния независимо для каждой из этих компонент, а, во-вторых, позволяет сделать вывод о различных механизмах образования этих деформаций.

Полученные результаты имеют большое значение и в механике поверхностно упрочненных элементов конструкций, в частности – для цилиндрических образцов, при оценке устойчивости наведенных остаточных напряжений к высокотемпературным нагрузкам, вызывающих появление деформаций ползучести. В этом случае разброс деформаций ползучести вызывает аналогичный разброс остаточных напряжений в процессе ползучести упрочненного образца. Поэтому для оценки скорости релаксаций остаточных напряжений детерминированных моделей явно недостаточно и требуется разработка соответствующих стохастических методик расчета. Кроме этого, методики экспериментального (точнее – расчетно-экспериментального) определения остаточных напряжений часто базируются на определении перемещений в осевом и окружном направлениях цилиндрических образцов. В частности, на этой основе разработан метод колец и полосок (вдоль образующей цилиндра) [31]. Понятно, что результаты измерений будут зависеть от места, где вырезано кольцо и полоска, по-

сколькx деформация ползучести имеет крайне неоднородное распределение по пространственной координате. Учет этой неоднородности позволяет научно-обоснованно трактовать соответствующие экспериментальные данные для остаточных напряжений в процессе ползучести.

В связи с вышеизложенным встает вопрос о разработке стохастической модели реологической деформации, которая учитывала бы стохастическую неоднородность, свойственную реальным материалам. Разработке данной модели посвящена следующая глава настоящей диссертации.

2.4. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

1. Комплексный анализ результатов экспериментальных исследований по непосредственному замеру локальных деформаций пластичности и ползучести по пространственной координате, совмещенный с анализом результатов экспериментальных исследований поверхностного слоя деформируемых цилиндрических образцов по параметрам шероховатости и микротвердости, позволил установить, что развитие деформации пластичности и ползучести идет независимо для каждой из этих компонент. Это дает возможность строить физические уравнения состояния независимо для каждой из этих компонент, в частности, не учитывать, влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть.

2. Проведены экспериментальные исследования двумерных стохастических полей неупругой деформации на плоских образцах из сплава АД1 в условиях растяжения и выполнен анализ характера их распределения.

3. Впервые экспериментально исследовано распределение локальной деформации ползучести по пространственной координате в пределах одного полого поверхностно упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т при осевом растяжении и $T = 125$ °С. Показано, что в пределах одного образца разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней может достигать 150-200%.

3. СТОХАСТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ СПЛАВА Д16Т ПРИ $T = 125$ °С

Результаты данной главы излагаются в соответствии с работами автора диссертации в соавторстве [70, 120].

3.1. ВЫБОР ОДНООСНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЕЕ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Один из основных этапов решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полем цилиндрическом образце вследствие ползучести – это построение уравнений состояния материала, связывающих между собой напряжения, реологические деформации и их скорости. В тоже время в главе 2 сказано, что явление ползучести сопровождается существенным разбросом данных, а это, в свою очередь, приведет к разбросу данных по релаксации остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических изделиях. Для учета факта рассеяния данных необходимо ставить и решать краевые задачи о релаксации остаточных напряжений в цилиндрических изделиях в стохастической постановке. При этом основной информацией являются стохастические физические уравнения состояния ползучести материала. В дальнейшем основным объектом исследования являлся полый цилиндрический образец из сплава Д16Т, упрочненный пневмодробеструйной обработкой (ПДО) микрошариками, находящийся в условиях высокотемпературной ползучести при осевом напряжении. Поэтому для оценки статистических характеристик остаточных напряжений в этом изделии необходимо построить стохастическую модель ползучести этого материала.

Один из подходов построения стохастических моделей ползучести предложен Ю.П. Самариным [138], а его дальнейшее развитие с изложением методики построения модели приведено в работе [132]. Согласно [132], стохастиче-

ская модель строится на базе детерминированной модели, т.е. первым этапом является построение детерминированных соотношений ползучести, в нашем случае – для сплава Д16Т при $T = 125$ °С. В главе 2 приведены среднеинтегральные экспериментальные данные для деформации ползучести 4 образцов: в соответствующих таблицах это деформации p_{1-10} для напряжений 353, 385 и 406,2 МПа и p_{1-8} для напряжения 420 МПа. На рис. 3.1 они представлены сплошными линиями. Из этих графиков следует, что кривые ползучести имеют только первую и вторую стадию. Второй особенностью ползучести этого сплава является отсутствие обратимой деформации при полной разгрузке образца. Чтобы построить детерминированную модель, используем теорию ползучести, предложенную Ю.П. Самариным [139], которая для одноосного напряженного состояния (то есть при отсутствии обратимой компоненты деформации ползучести) для первых двух стадий имеет вид:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= v(t) + w(t); \\
 v(t) &= \sum_{k=1}^s v_k(t); \\
 \dot{v}_k(t) &= \begin{cases} \lambda_k \left[a_k \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n - v_k(t) \right], & b_k \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n > v_k, \\ 0, & a_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^m \leq v_k; \end{cases} \\
 \dot{w}(t) &= c \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^m,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где v – вязкопластическая компонента деформации ползучести p (описывает первую стадию ползучести), w – деформация вязкого течения (описывает вторую стадию ползучести), c , m , λ_k , a_k , n , σ^* , s – параметры модели, методика определения которых описана в работе [139] (σ^* – обезразмеривающий коэффициент, который выбирается, вообще говоря, произвольно, исходя из удобства).

Отметим, что детерминированная модель для сплава Д16Т при $T = 125$ °С была построена в диссертационной работе Лунина В.В. [53]. Поэтому воспользуемся результатами идентификации параметров модели (3.1) указанной рабо-

ты, в которой реализована методика работы [139]. Согласно [139] параметры модели (3.1) определяются по двумерной аппроксимации кривых ползучести при $\sigma = \text{const}$, в этом случае интегрирование (3.1) позволяет получить двумерную аналитическую зависимость вида:

$$p(t) = \sum_{k=1}^s a_k (1 - e^{-\lambda_k t}) \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n + c \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^m t. \quad (3.2)$$

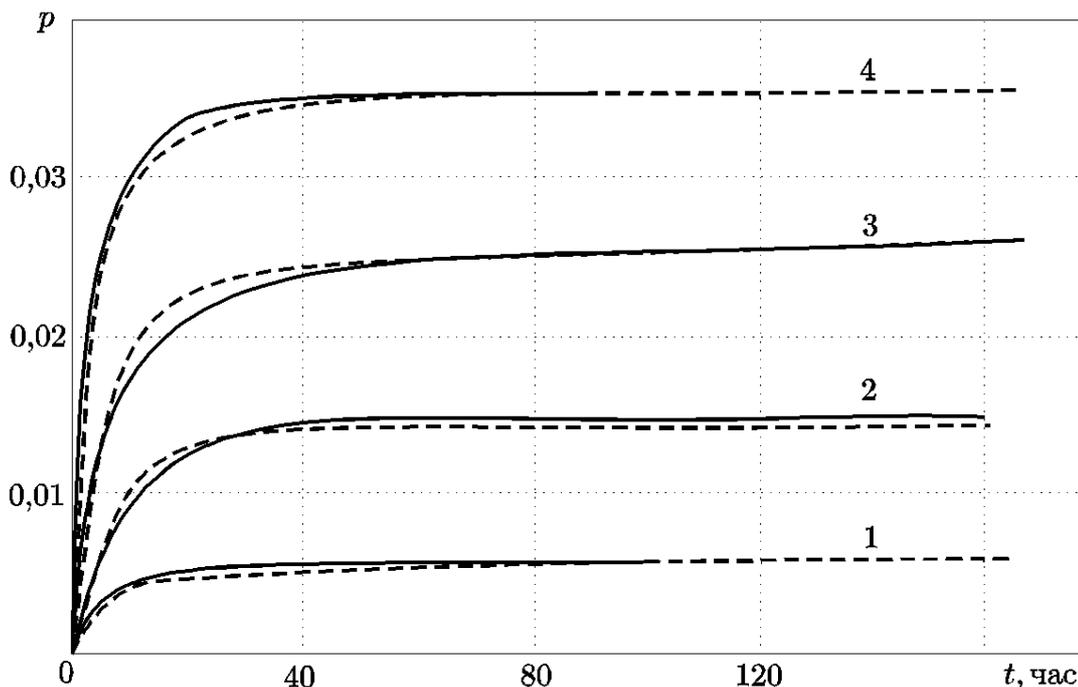


Рис. 3.1. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) кривые ползучести сплава Д16Т при $T = 125^{\circ}\text{C}$. Цифры 1 – $\sigma_z = 353$ МПа; 2 – $\sigma_z = 385$ МПа; 3 – $\sigma_z = 406,2$ МПа; 4 – $\sigma_z = 420$ МПа [53]

В работе [53], используя методику [139], определены численные значения параметров аппроксимации (3.2) и окончательный вид аппроксимации экспериментальных кривых ползучести, представленных на рис. 3.1, имеет вид:

$$p(t) = 4,703 \cdot 10^{-20} (1 - e^{-0,17t}) \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^{11} + 4,34 \cdot 10^{-23} \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^{10,787} t. \quad (3.3)$$

Из (3.3) следует, что количество экспонент в (3.1) $s = 1$, $\lambda = 0,17$ 1/час, $a_k = a = 4,703 \cdot 10^{-20}$; $c = 4,34 \cdot 10^{-23}$; $\sigma^* = 10$ МПа; $n = 11$; $m = 10,787$.

Таким образом, данные значения параметров можно использовать в одноосной детерминированной модели ползучести (3.1) и при любых законах изменения $\sigma = \sigma(t)$.

Теоретические расчетные значения, вычисленные по формуле (3.3), обозначены на рис. 3.1 штриховыми линиями (экспериментальные значения – сплошные линии). Из анализа рис. 3.1 следует хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Так, погрешность отклонения Δ расчетных данных от экспериментальных в норме

$$\Delta = \left[\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{\sum_{i=1}^n [p_i^j(t_i) - p_i^{*j}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [p_i^{*j}(t_i)]^2} \right]^{1/2} \cdot 100\%,$$

где $p_i^j(t_i)$ – расчетные, а $p_i^{*j}(t_i)$ – экспериментальные значения деформации ползучести в точках дискретизации $t = t_i$ ($i = \overline{1, n}$), n – число точек дискретизации, j – номер кривой ползучести ($j = \overline{1, 4}$), составляет величину $\Delta = 4,6\%$.

Рассмотрим теперь второй этап – построение стохастической модели для сплава Д16Т при $T = 125$ °С на основании обобщения детерминированной модели (3.1). Для описания макронеоднородностей будем исходить из подхода, предложенного Ю.П. Самариным [138] и описанного в главе 1. В качестве базовой стохастической модели будем использовать вариант (1.4), который использовался во многих работах, в частности, в диссертации С. А. Дудкина [30], работе [132] и других. Итак, учитывая, что число экспонент в детерминированной модели ползучести сплава Д16Т $s = 1$ и отсутствует вязкоупругая компонента u , вариант стохастических уравнений ползучести для сплава Д16Т будет частным случаем (1.4) и имеет вид

$$\begin{aligned}
p(t) &= v(t) + w(t); \\
\dot{v}(t) &= \begin{cases} \lambda \left[A_1 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^n - v(t) \right], & A_1 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^n > v(t), \\ \mathbf{0}, & A_1 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^n \leq v(t); \end{cases} \\
\dot{w}(t) &= A_2 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^m,
\end{aligned} \tag{3.4}$$

где A_1 и A_2 – случайные величины, n , m , σ^* , λ – детерминированные величины, значения для которых берутся из детерминированной модели. Здесь учтено, что для описания первой стадии ползучести сплава Д16Т при $T = 125$ °С достаточно одного слагаемого для определения величины вязкопластической компоненты $v_k(t)$ в (3.1).

При постоянном напряжении можно сразу получить (см. (3.3))

$$p(t) = A_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n (1 - e^{-\lambda t}) + A_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^m t, \tag{3.5}$$

где $n = 10,787$; $m = 11$, $\lambda = 0,17$; $\sigma^* = 10$, а A_1 и A_2 – случайные числа. Предложение (3.5) означает, что всегда можно получить достаточно точное аналитическое приближение к любой реализации (кривой ползучести) при $\sigma = \text{const}$, подобрав значения случайных величин A_1 и A_2 .

Следующим этапом исследования является статистическое исследование по определению спектра случайных величин A_1 и A_2 на основании линейной регрессионной модели (3.5). Для этого необходимо иметь выборку экспериментальных кривых ползучести. Стандартным методом получения выборки является статистический набор кривых одноосной ползучести конкретных образцов при различных постоянных напряжениях, в предыдущей терминологии – это среднеинтегральные кривые ползучести по всей рабочей части. Поэтому, если нужно получить, например, N реализаций, то нужно провести N испытаний образцов на ползучесть. Этот подход имеет ряд недостатков. Во-первых, это достаточно большой объем экспериментальных исследований на одноосную ползучесть при существенной технической трудности такого рода эксперименталь-

ных исследований, требующих специализированных (уже имеющихся) испытательных машин или специально разработанных установок (как при исследовании описанных уже испытаний для сплава Д16Т). Во-вторых, это факторы повышенной температуры и времени, поскольку длительность непрерывных испытаний даже для одного образца может составлять от сотен часов до нескольких тысяч. В-третьих, как показал выполненный ранее анализ стохастических полей распределения деформации ползучести по длине одного образца (см. рис. 2.29-2.32), разброс внутри образца может составлять до 150-200% от среднеинтегральной деформации ползучести образца. А это означает, что спектр среднеинтегральных кривых ползучести по всем образцам будет давать заниженные данные по реальным флуктуациям локальной деформации ползучести внутри образца.

В связи с вышеизложенным, в данной работе выборка реализаций – кривых ползучести для определения конкретных значений A_1 и A_2 на основе аппроксимации (3.5) – построена всего по 4 испытанным образцам. Для этого использовались кривые ползучести каждого из локальных участков цилиндрических образцов из сплава Д16Т при каждом из четырех уровней напряжения.

Экспериментальные данные, приведенные в главе 2, были обработаны применительно к получению кривых одноосной ползучести каждого локального участка (см. табл. 2.7 и рис. 2.28–2.31). Результаты экспериментальных данных для каждой локальной области (условно – локального стержня) представлены в таблице 3.1 (значение в числителе каждой дроби таблицы). Здесь номера образцов 1-4 соответствуют осевым напряжениям 353; 385; 406,2 и 420 МПа соответственно. Напомним, что первые 3 образца разбивались на 9 участков, а четвертый – на 7 участков.

Используя теперь экспериментальные кривые ползучести каждого из участков $[p_i, p_{i+1}]$, на основании (3.5) можно определить значения $A_i (i = 1, 2)$ для каждой из реализаций. Изложим соответствующую методику на основе регрессионного анализа.

Для простоты записи введем коэффициенты:

$$c = \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^{11}; d = \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^{10,787}. \quad (3.6)$$

Тогда выражение для деформации (3.5) примет вид:

$$p(t_i) = A_1 d(1 - e^{-0,17t_i}) + A_2 c t_i, \quad (3.7)$$

где t_i – дискретные значения времени.

Найдем коэффициенты регрессии $A_i (i = 1, 2)$ по методу наименьших квадратов. Для целевой функции

$$\Phi(A_1, A_2) = \sum_{i=1}^n (p(t_i) - (A_1 d(1 - e^{-0,17t_i}) + A_2 c t_i))^2 \rightarrow \min$$

имеем

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial A_1} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial A_2} = 0, \end{cases}$$

или в развернутой записи:

$$\begin{cases} -d\varphi_1(t_i) + A_1 d^2 \varphi_2(t_i) + A_2 c d \varphi_3(t_i) = 0, \\ -c\varphi_4(t_i) + A_1 c d \varphi_3(t_i) + A_2 c^2 \varphi_5(t_i) = 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1(t_i) &= \sum_{i=1}^n p(t_i)(1 - e^{-0,17t_i}), \quad \varphi_2(t_i) = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-0,17t_i})^2, \\ \varphi_3(t_i) &= \sum_{i=1}^n t_i(1 - e^{-0,17t_i}), \quad \varphi_4(t_i) = \sum_{i=1}^n p(t_i)t_i, \quad \varphi_5(t_i) = \sum_{i=1}^n t_i^2. \end{aligned}$$

Решая систему (3.16), находим коэффициенты регрессии (3.15):

$$\begin{cases} A_2 = \frac{\varphi_2(t_i)\varphi_4(t_i) - \varphi_1(t_i)\varphi_3(t_i)}{c(\varphi_2(t_i)\varphi_5(t_i) - \varphi_3^2(t_i))}, \\ A_1 = \frac{\varphi_1(t_i)\varphi_2(t_i) - \varphi_3(t_i)\varphi_4(t_i)}{d(\varphi_2(t_i)\varphi_5(t_i) - \varphi_3^2(t_i))}. \end{cases}$$

Таблица 3.1

Экспериментальные (числитель дроби) и расчетные по соотношению (3.5) (знаменатель дроби) значения деформации ползучести участков образцов

№ об- разца	Время испыт., час	Деформации участков								
		р ₁₋₂	р ₂₋₃	р ₃₋₄	р ₄₋₅	р ₅₋₆	р ₆₋₇	р ₇₋₈	р ₈₋₉	р ₉₋₁₀
1	0	$\frac{0}{0}$								
	24	$\frac{0,0051}{0,0042}$	$\frac{0,0069}{0,0061}$	$\frac{0,0041}{0,0037}$	$\frac{0,0071}{0,0070}$	$\frac{0,0050}{0,0047}$	$\frac{0,0045}{0,0047}$	$\frac{0,0055}{0,0057}$	$\frac{0,0018}{0,0018}$	$\frac{0,0022}{0,0022}$
	48	$\frac{0,0054}{0,0051}$	$\frac{0,0070}{0,0067}$	$\frac{0,0045}{0,0043}$	$\frac{0,0080}{0,0076}$	$\frac{0,0053}{0,0053}$	$\frac{0,0052}{0,0050}$	$\frac{0,0064}{0,0062}$	$\frac{0,0022}{0,0022}$	$\frac{0,0023}{0,0027}$
	72	$\frac{0,0058}{0,0059}$	$\frac{0,0071}{0,0071}$	$\frac{0,0049}{0,0049}$	$\frac{0,0082}{0,0081}$	$\frac{0,0054}{0,0058}$	$\frac{0,0053}{0,0052}$	$\frac{0,0067}{0,0065}$	$\frac{0,0022}{0,0025}$	$\frac{0,0029}{0,0031}$
	100	$\frac{0,0068}{0,0069}$	$\frac{0,0076}{0,0077}$	$\frac{0,0055}{0,0056}$	$\frac{0,0084}{0,0086}$	$\frac{0,0063}{0,0065}$	$\frac{0,0054}{0,0055}$	$\frac{0,0068}{0,0070}$	$\frac{0,0028}{0,0028}$	$\frac{0,0036}{0,0037}$
2	0	$\frac{0}{0}$								
	9	$\frac{0,0118}{0,0102}$	$\frac{0,0095}{0,0084}$	$\frac{0,0122}{0,0125}$	$\frac{0,0023}{0,0054}$	$\frac{0,0096}{0,0080}$	$\frac{0,0103}{0,0081}$	$\frac{0,0110}{0,0086}$	$\frac{0,0103}{0,0091}$	$\frac{0,0236}{0,0265}$
	25	$\frac{0,0134}{0,0133}$	$\frac{0,0107}{0,0106}$	$\frac{0,0130}{0,0170}$	$\frac{0,0088}{0,0072}$	$\frac{0,0101}{0,0104}$	$\frac{0,0106}{0,0106}$	$\frac{0,0110}{0,0110}$	$\frac{0,0134}{0,0120}$	$\frac{0,0338}{0,0338}$
	50	$\frac{0,0149}{0,0145}$	$\frac{0,0112}{0,0110}$	$\frac{0,0134}{0,0195}$	$\frac{0,0091}{0,0079}$	$\frac{0,0108}{0,0112}$	$\frac{0,0107}{0,0114}$	$\frac{0,0119}{0,0115}$	$\frac{0,0135}{0,0130}$	$\frac{0,0369}{0,0351}$
	75	$\frac{0,0161}{0,0155}$	$\frac{0,0114}{0,0113}$	$\frac{0,0200}{0,0219}$	$\frac{0,0094}{0,0085}$	$\frac{0,0134}{0,0120}$	$\frac{0,0116}{0,0121}$	$\frac{0,0120}{0,0119}$	$\frac{0,0143}{0,0138}$	$\frac{0,0372}{0,0359}$
	100	$\frac{0,0172}{0,0165}$	$\frac{0,0117}{0,0115}$	$\frac{0,0248}{0,0243}$	$\frac{0,0096}{0,0092}$	$\frac{0,0135}{0,0127}$	$\frac{0,0129}{0,0127}$	$\frac{0,0124}{0,0122}$	$\frac{0,0152}{0,0147}$	$\frac{0,0372}{0,0367}$
	162	$\frac{0,0183}{0,0190}$	$\frac{0,0119}{0,0121}$	$\frac{0,0296}{0,0301}$	$\frac{0,0098}{0,0108}$	$\frac{0,0136}{0,0144}$	$\frac{0,0141}{0,0144}$	$\frac{0,0129}{0,0132}$	$\frac{0,0162}{0,0168}$	$\frac{0,0373}{0,0386}$
3	0	$\frac{0}{0}$								
	5	$\frac{0,0066}{0,0049}$	$\frac{0,0065}{0,0043}$	$\frac{0,0029}{0,0074}$	$\frac{0,0212}{0,0140}$	$\frac{0,0240}{0,0161}$	$\frac{0,0247}{0,0196}$	$\frac{0,0277}{0,0174}$	$\frac{0,0264}{0,0184}$	$\frac{0,0252}{0,0212}$
	8	$\frac{0,0079}{0,0063}$	$\frac{0,0087}{0,0056}$	$\frac{0,0034}{0,0097}$	$\frac{0,0221}{0,0182}$	$\frac{0,0245}{0,0209}$	$\frac{0,0289}{0,0255}$	$\frac{0,0293}{0,0226}$	$\frac{0,0296}{0,0239}$	$\frac{0,0320}{0,0275}$
	25	$\frac{0,0081}{0,0086}$	$\frac{0,0090}{0,0077}$	$\frac{0,0142}{0,0140}$	$\frac{0,0234}{0,0241}$	$\frac{0,0263}{0,0278}$	$\frac{0,0327}{0,0340}$	$\frac{0,0296}{0,0301}$	$\frac{0,0298}{0,0318}$	$\frac{0,0348}{0,0367}$
	50	$\frac{0,0091}{0,0091}$	$\frac{0,0090}{0,0083}$	$\frac{0,0161}{0,0159}$	$\frac{0,0240}{0,0245}$	$\frac{0,0271}{0,0284}$	$\frac{0,0337}{0,0348}$	$\frac{0,0296}{0,0309}$	$\frac{0,0306}{0,0325}$	$\frac{0,0364}{0,0375}$
	75	$\frac{0,0099}{0,0095}$	$\frac{0,0093}{0,0088}$	$\frac{0,0170}{0,0178}$	$\frac{0,0245}{0,0245}$	$\frac{0,0278}{0,0285}$	$\frac{0,0341}{0,0352}$	$\frac{0,0297}{0,0312}$	$\frac{0,0332}{0,0327}$	$\frac{0,0368}{0,0379}$
	166	$\frac{0,0105}{0,0108}$	$\frac{0,0102}{0,0106}$	$\frac{0,0235}{0,0244}$	$\frac{0,0249}{0,0245}$	$\frac{0,0287}{0,0292}$	$\frac{0,0346}{0,0366}$	$\frac{0,0327}{0,0322}$	$\frac{0,0334}{0,0334}$	$\frac{0,0375}{0,0390}$

Таблица 3.1 (продолжение)

4	0	$\frac{0}{0}$								
	2	$\frac{0,0164}{0,0099}$	$\frac{0,0256}{0,0094}$	$\frac{0,0239}{0,0097}$	$\frac{0,0253}{0,0111}$	$\frac{0,0247}{0,0089}$	$\frac{0,0279}{0,0116}$	$\frac{0,0306}{0,0110}$		
	5	$\frac{0,0253}{0,0196}$	$\frac{0,0260}{0,0187}$	$\frac{0,0257}{0,0193}$	$\frac{0,0255}{0,0220}$	$\frac{0,0269}{0,0178}$	$\frac{0,0287}{0,0232}$	$\frac{0,0310}{0,0220}$		
	9	$\frac{0,0260}{0,0270}$	$\frac{0,0301}{0,0259}$	$\frac{0,0328}{0,0267}$	$\frac{0,0304}{0,0301}$	$\frac{0,0290}{0,0247}$	$\frac{0,0388}{0,0321}$	$\frac{0,0351}{0,0303}$		
	12	$\frac{0,0328}{0,0302}$	$\frac{0,0315}{0,0290}$	$\frac{0,0329}{0,0299}$	$\frac{0,0314}{0,0334}$	$\frac{0,0301}{0,0276}$	$\frac{0,0395}{0,0359}$	$\frac{0,0371}{0,0339}$		
	30	$\frac{0,0333}{0,0356}$	$\frac{0,0325}{0,0350}$	$\frac{0,0339}{0,0360}$	$\frac{0,0340}{0,0382}$	$\frac{0,0315}{0,0336}$	$\frac{0,0400}{0,0436}$	$\frac{0,0372}{0,0403}$		
	58	$\frac{0,0347}{0,0378}$	$\frac{0,0330}{0,0384}$	$\frac{0,0343}{0,0393}$	$\frac{0,0341}{0,0384}$	$\frac{0,0318}{0,0373}$	$\frac{0,0402}{0,0482}$	$\frac{0,0383}{0,0433}$		
	83	$\frac{0,0351}{0,0395}$	$\frac{0,0339}{0,0412}$	$\frac{0,0345}{0,0422}$	$\frac{0,0401}{0,0385}$	$\frac{0,0320}{0,0405}$	$\frac{0,0419}{0,0521}$	$\frac{0,0401}{0,0457}$		

Коэффициенты регрессии (3.7) A_1 и A_2 , полученные из решения системы линейных алгебраических уравнений (3.8), представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Численные значения коэффициентов A_1 и A_2

	σ , МПа	A_1	A_2
1	353	$6,95331 \cdot 10^{-20}$	$3,25217 \cdot 10^{-22}$
2		$1,1638 \cdot 10^{-19}$	$1,76835 \cdot 10^{-22}$
3		$6,31939 \cdot 10^{-20}$	$2,31661 \cdot 10^{-22}$
4		$1,34764 \cdot 10^{-19}$	$1,81782 \cdot 10^{-22}$
5		$8,60158 \cdot 10^{-20}$	$2,05674 \cdot 10^{-22}$
6		$9,06332 \cdot 10^{-20}$	$9,4505 \cdot 10^{-23}$
7		$1,08653 \cdot 10^{-19}$	$1,49614 \cdot 10^{-22}$
8		$3,09823 \cdot 10^{-20}$	$1,20376 \cdot 10^{-22}$
9		$3,70073 \cdot 10^{-20}$	$1,7157 \cdot 10^{-22}$
10	385	$9,88896 \cdot 10^{-20}$	$1,45586 \cdot 10^{-22}$
11		$8,33468 \cdot 10^{-20}$	$3,47675 \cdot 10^{-23}$
12		$1,16987 \cdot 10^{-19}$	$3,43319 \cdot 10^{-22}$
13		$5,22647 \cdot 10^{-20}$	$9,35814 \cdot 10^{-23}$
14		$7,7655 \cdot 10^{-20}$	$1,02969 \cdot 10^{-22}$

Таблица 3.2 (продолжение)

15		$7,91157 \cdot 10^{-20}$	$9,90732 \cdot 10^{-23}$
16		$8,51452 \cdot 10^{-20}$	$5,33608 \cdot 10^{-23}$
17		$8,89701 \cdot 10^{-20}$	$1,24615 \cdot 10^{-22}$
18		$2,64734 \cdot 10^{-20}$	$1,14525 \cdot 10^{-22}$
19	406,2	$3,70915 \cdot 10^{-20}$	$2,90092 \cdot 10^{-23}$
20		$3,25556 \cdot 10^{-20}$	$3,90085 \cdot 10^{-23}$
21		$5,45253 \cdot 10^{-20}$	$1,46755 \cdot 10^{-22}$
22		$1,08 \cdot 10^{-19}$	$7,95296 \cdot 10^{-25}$
23		$1,24213 \cdot 10^{-19}$	$1,36643 \cdot 10^{-23}$
24		$1,51011 \cdot 10^{-19}$	$3,11555 \cdot 10^{-23}$
25		$1,34106 \cdot 10^{-19}$	$2,40654 \cdot 10^{-23}$
26		$1,42062 \cdot 10^{-19}$	$1,60573 \cdot 10^{-23}$
27		$1,63508 \cdot 10^{-19}$	$2,56279 \cdot 10^{-23}$
28		420	$1,04192 \cdot 10^{-19}$
29	$9,85597 \cdot 10^{-20}$		$6,69303 \cdot 10^{-23}$
30	$1,00743 \cdot 10^{-19}$		$7,99364 \cdot 10^{-23}$
31	$1,08734 \cdot 10^{-19}$		$6,99691 \cdot 10^{-23}$
32	$9,3573 \cdot 10^{-20}$		$7,22885 \cdot 10^{-23}$
33	$1,21625 \cdot 10^{-19}$		$9,24296 \cdot 10^{-23}$
34	$1,18634 \cdot 10^{-19}$		$3,20556 \cdot 10^{-23}$

В таблице 3.1 в знаменатели дроби представлены результаты расчета деформации ползучести каждого локального участка по регрессионной модели (3.5) с найденными из таблицы 3.2 значениями A_1 и A_2 .

В качестве примера на рис. 3.2–3.5 приведены экспериментальные данные (значки) и их аппроксимация по модели (3.5) с найденными значениями случайных величин A_1 и A_2 (сплошные линии) для некоторых конкретных реализаций. Из данных таблицы 3.1 и рис. 3.2–3.5 видно, что имеет место хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных для конкретных реализаций.

Прокомментируем полученные в таблицах 3.1 и 3.2 результаты. Во-первых, используя разработанный подход для идентификации параметров, получены 34 отдельные реализации кривых ползучести всего по 4 испытанным образцам. Если бы использовался стандартный (в определенном смысле – классический) подход, то нужно было бы испытать 34 образца при различных постоянных напряжениях. В конкретном примере количество испытаний образцов на одноосную ползучесть сокращено более чем в 8 раз, а это с учетом длительности и непрерывности испытаний – существенное сокращение финансовых и других ресурсов на проведение исследований. Во-вторых, разработанный подход получения реализаций позволяет учесть реальный разброс локальных деформаций ползучести внутри образца, который существенно выше, чем при анализе среднеинтегральной деформации ползучести образцов.

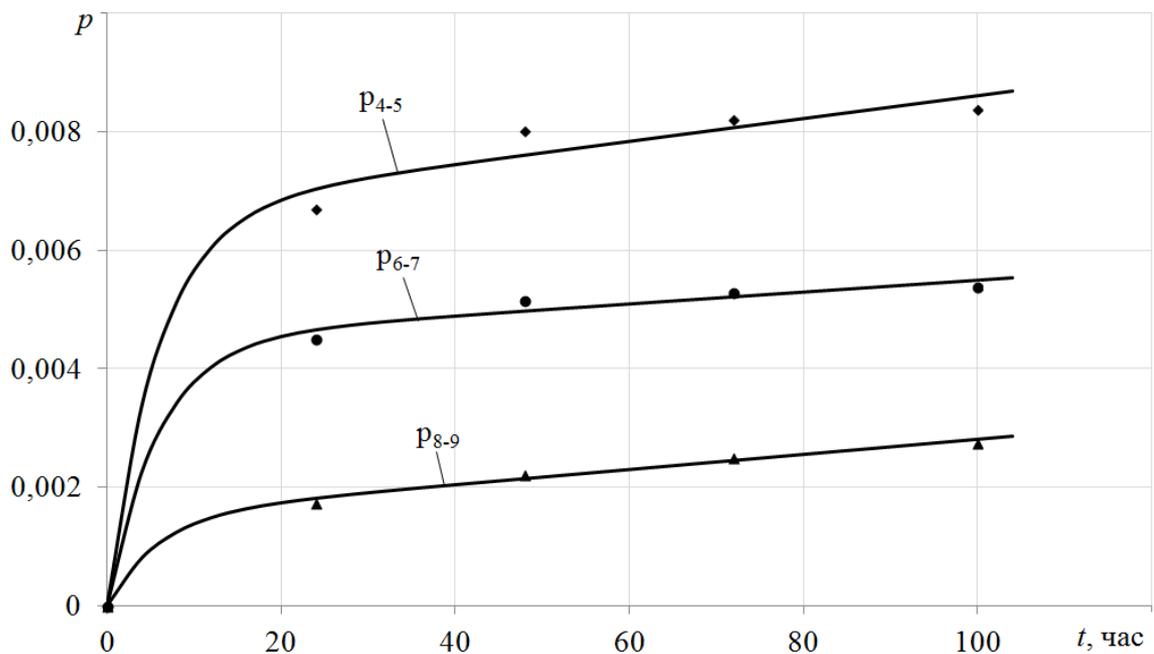


Рис. 3.2. Графики ползучести участков 4-5, 6-7 и 8-9 образца №1 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 353$ МПа. Точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные по регрессионной модели

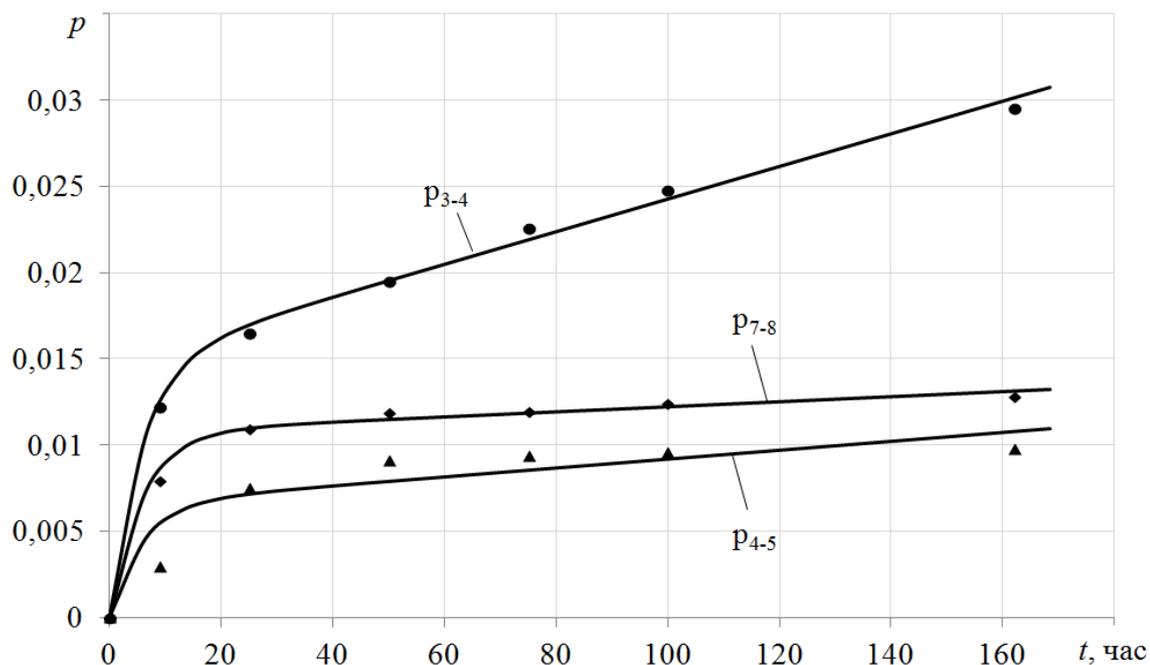


Рис. 3.3. Графики ползучести участков 3-4, 4-5 и 7-8 образца №2 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 385$ МПа. Точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные по регрессионной модели

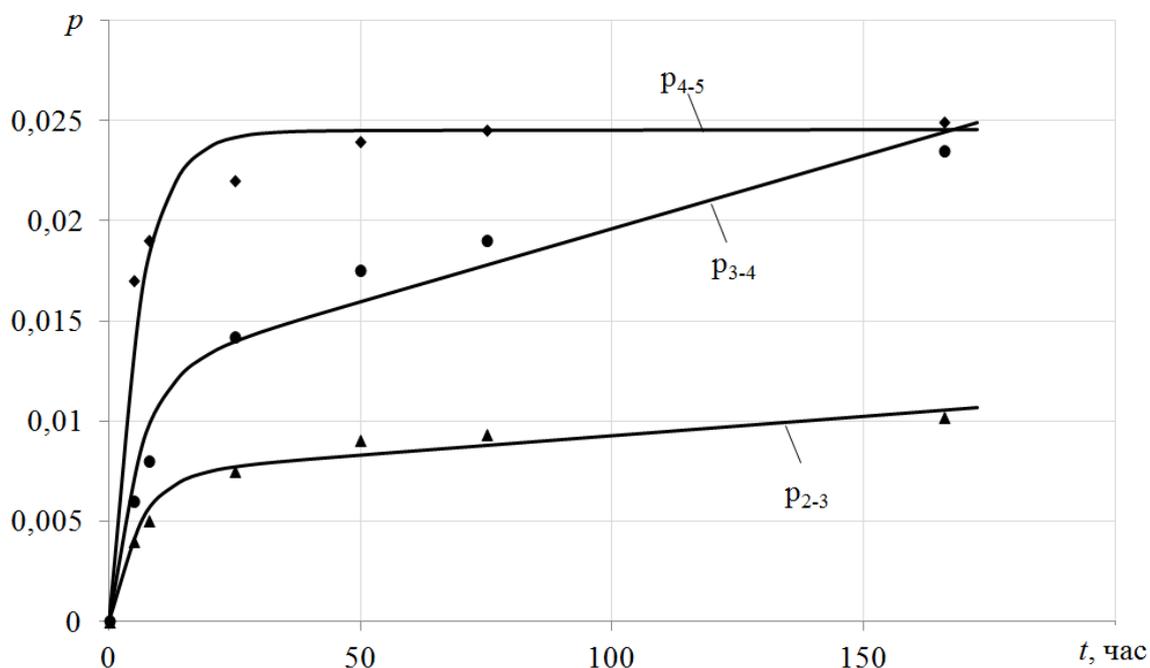


Рис. 3.4. Графики ползучести участков 2-3, 3-4 и 4-5 образца №3 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 406,2$ МПа. Точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные по регрессионной модели

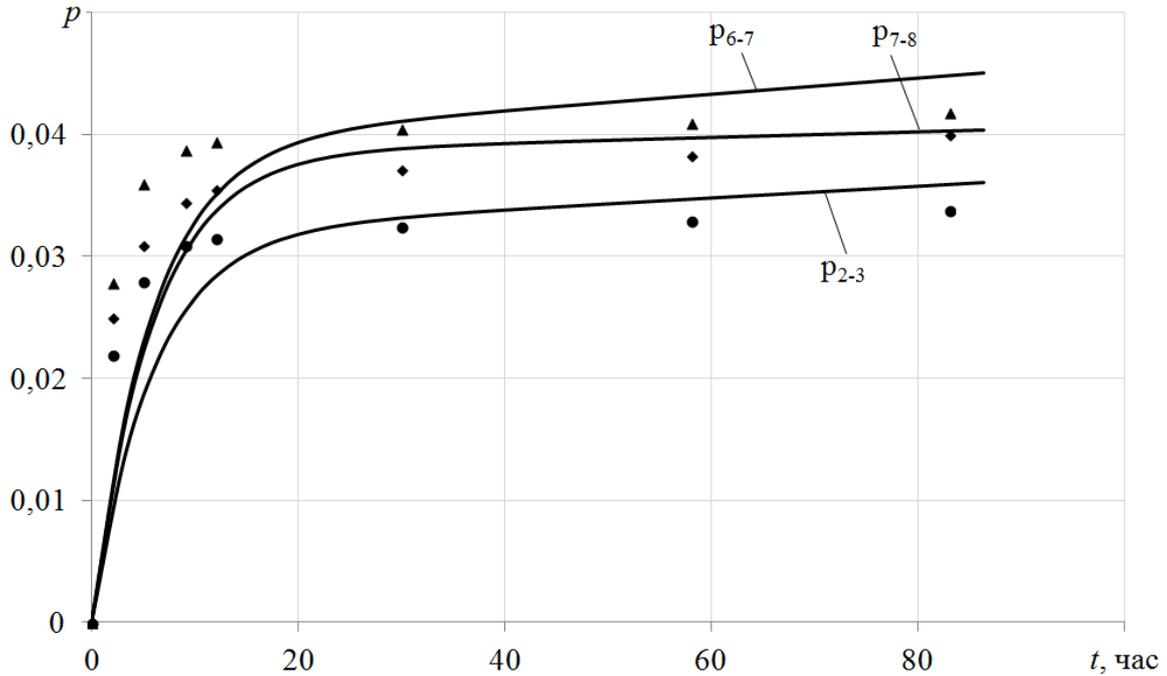


Рис. 3.5. Графики ползучести участков 3-4, 4-5 и 6-7 образца №3 из сплава Д16Т при $\sigma_z = 420$ МПа. Точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные по регрессионной модели

Для получения статистической информации о случайных величинах A_1 и A_2 найдем их моменты первого и второго порядка: математическое ожидание и дисперсию, а также среднеквадратическое отклонение по известным формулам:

$$M[A_i] = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T A_i^j;$$

$$D[A_i] = \frac{1}{T-1} \sum_{j=1}^T (A_i^j - M[A_i])^2; \quad (3.9)$$

$$S[A_i] = \sqrt{D(A_i)} \quad (i = 1, 2).$$

Здесь величина $T = 34$. Выполненные на основании данных таблицы 3.2 расчеты дают:

$$M[A_1] = 9,95 \cdot 10^{-20}; \quad M[A_2] = 1,19 \cdot 10^{-22}; \quad D[A_1] = 2,00 \cdot 10^{-39};$$

$$D[A_2] = 7,43 \cdot 10^{-45}; \quad S[A_1] = 4,47 \cdot 10^{-20}; \quad S[A_2] = 8,62 \cdot 10^{-23}.$$

Выясним теперь, являются ли величины A_1 и A_2 статистически зависимыми (коррелированными) или независимыми (некоррелированными). Для этой

цели найдем значение нормированной корреляционной функции между случайными векторами A_1 и A_2 с использованием следующих формул:

$$K[A_1, A_2] = \frac{1}{T-1} \sum_{j=1}^T (A_1^j - M[A_1])(A_2^j - M[A_2]),$$

$$r(A_1, A_2) = \frac{K(A_1, A_2)}{S(A_1)S(A_2)},$$
(3.10)

где $T = 34$, а величины $M[A_i]$ и $S[A_i]$ определяются по (3.17).

Результаты вычислений дали значение $r(A_1, A_2) = -0,13$. Отсюда можно сделать вывод о статистической независимости (некоррелированности) случайных величин A_1 и A_2 .

Таким образом, стохастическая модель ползучести сплава Д16Т состоит из уравнений (3.4), при этом характеристики случайных величин A_1 и A_2 задаются формулами (3.9), (3.10). Зная все характеристики случайных величин A_1 и A_2 , можно найти характеристики случайного процесса для деформации ползучести $p = p(t)$ при $\sigma = \text{const}$ по (3.5) в аналитическом виде. Задача упрощается тем, что, во-первых, (3.5) есть стохастически линейная модель, во-вторых, величины A_1 и A_2 можно считать некоррелированными (хотя это условие можно и не использовать). Поэтому

$$M[p(t)] = M[A_1] \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n (1 - e^{-\lambda t}) + M[A_2] \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^m t,$$

$$D[p(t)] = D[A_1] \left(\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n (1 - e^{-\lambda t})\right)^2 + D[A_2] \left(\left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^m t\right)^2.$$
(3.11)

Имея величины $M[p(t)]$ и $D[p(t)]$ и, исходя, например, из нормального закона распределения, можно построить и доверительные интервалы для величины $M[p(t)]$. Доверительный интервал определяется следующим выражением:

$$\left(M[p(t)] - t_{\text{кр}} \frac{\sqrt{D[p(t)]}}{\sqrt{T}}; M[p(t)] + t_{\text{кр}} \frac{\sqrt{D[p(t)]}}{\sqrt{T}} \right),$$

где $M[p(t)]$ – математическое ожидание величины $p(t)$, определяемое из соотношения (3.11), $D[p(t)]$ – дисперсия величины $p(t)$, определяемая также из

(3.11), $T = 34$, $t_{кр}$ определяется по таблицам функции Лапласа. Положим величину вероятности 0,95 – тогда $t_{кр} = 1,96$.

Результаты построения доверительных интервалов для всех видов напряжений приведены на рис. 3.6. Здесь пунктирная линия – минимум доверительного интервала, сплошная линия – максимум доверительного интервала, маркеры – экспериментальные данные. Из графиков на рис. 3.6 видно хорошее соответствие экспериментальных данных и доверительных интервалов для величины $M[p(t)]$.

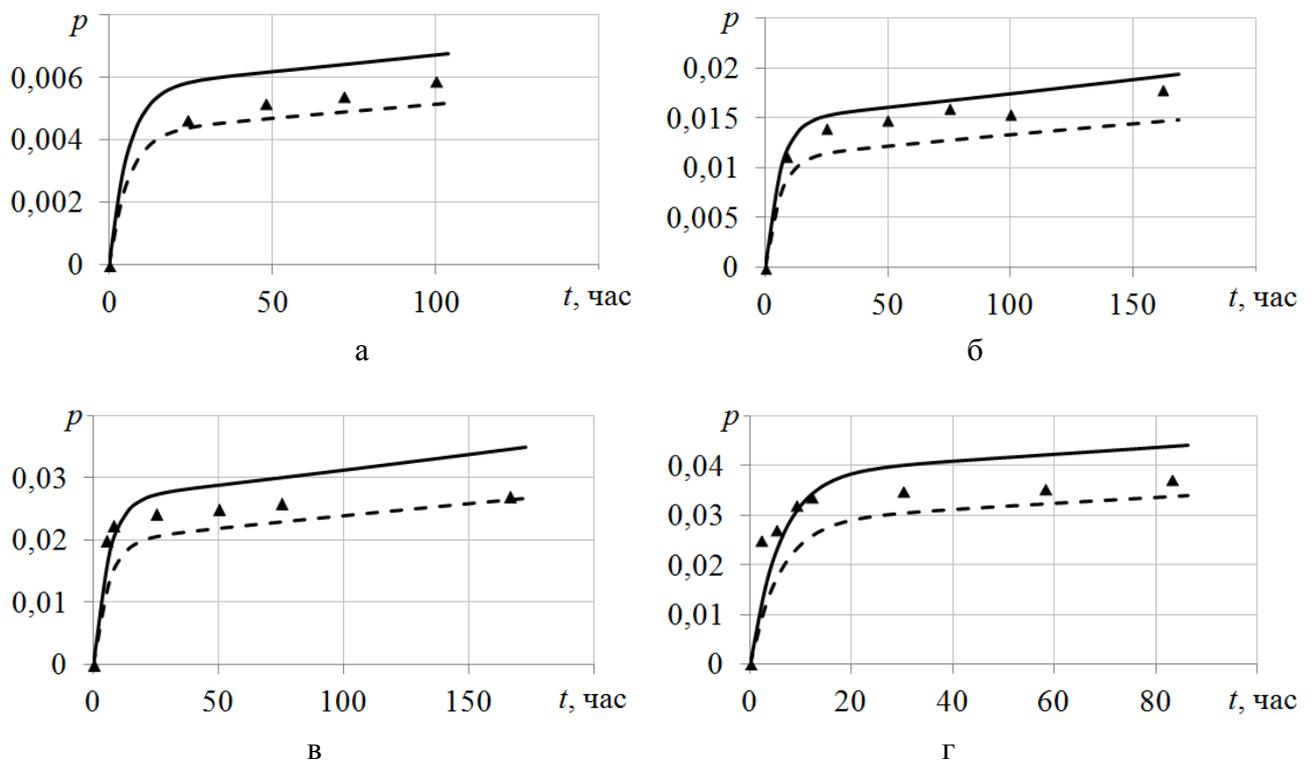


Рис. 3.6. Доверительные интервалы для величины $M[p(t)]$: а – 353 МПа; б – 385 МПа; в – 406,2 МПа; г – 420 МПа

3.2. ОБОБЩЕНИЕ ОДНООСНОЙ МОДЕЛИ НА СЛОЖНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Обобщение стохастической одноосной модели ползучести (3.4) на сложное напряженное состояние осуществляется аналогично обобщению соответствующей детерминированной модели (3.1) на сложное напряженное состояние, которое выполнено в работе [139]. Тогда стохастический вариант при сложном напряженном состоянии в соответствии с рекомендациями [139] будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 p_{ij} &= v_{ij} + w_{ij}; \\
 \dot{w}_{ij} &= \frac{3}{2} A_2 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{m-1} \left[\frac{1}{\sigma^*} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_0 \delta_{ij} \right) \right], \sigma_0 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}; \\
 \dot{v}_{vv}(t) &= (1 + \mu_k) \beta_{vv}(t) - \mu_k (\beta_{11} + \beta_{22} + \beta_{33}); \\
 \dot{\beta}_{vv} &= \begin{cases} \lambda \left[A_1 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{n-1} \frac{\sigma_{vv}}{\sigma^*} - \beta_{vv}(t) \right], & \left[A_1 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{n-1} \frac{\sigma_{vv}}{\sigma^*} - \beta_{vv}(t) \right] \sigma_{vv} > 0, \\ 0, & \left[A_1 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{n-1} \frac{\sigma_{vv}}{\sigma^*} - \beta_{vv}(t) \right] \sigma_{vv} \leq 0; \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

где p_{ij} – тензор деформации ползучести; w_{ij} , v_{ij} – тензоры деформаций вязкого течения и вязкопластической (необратимой) компоненты p_{ij} ; S – интенсивность напряжений; μ_k – коэффициент Пуассона для компоненты v_{vv} (согласно рекомендации, приведенной в [139], можно использовать $\mu_k = 0,42$); A_1 , A_2 , n , λ , m – параметры, имеющие тот же смысл, что и в модели (3.4). Расчет для компоненты v_{ij} ведется в главных осях, так что суммирование по индексу ν в (3.12) отсутствует.

Одно из достоинств модели (3.12) состоит в том, что все параметры, случайные A_1 и A_2 и детерминированные n , m , λ , могут быть определены по результатам одноосных экспериментальных данных.

Таким образом, модель (3.12) может быть использована при решении стохастических краевых задач. В настоящей диссертации она использовалась для решения задачи релаксации остаточных напряжений в полом цилиндрическом образце из сплава Д16Т.

3.3. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

1. Предложены стохастические уравнения неупругого реологического деформирования в условиях ползучести для одноосного и сложного напряженного состояния применительно к сплаву Д16Т при температуре $T = 125$ °С.

2. Разработана новая методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая существенно сократить объем экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно макросредней (среднеинтегральной), реализованная применительно к модели для сплава Д16Т при $T = 125$ °С.

3. Аналитически описан случайный процесс развития деформации ползучести во времени при одноосном растяжении, определены зависимости для функций математического ожидания и дисперсии. Наблюдается соответствие расчетных данных по стохастической модели с экспериментальными данными для сплава Д16Т.

4. РЕШЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОГО ПОЛОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ИЗ СПЛАВА Д16Т В УСЛОВИЯХ РАСТЯЖЕНИЯ ПРИ $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$

Метод решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненного полого цилиндрического образца излагается в настоящей работе впервые. Он основан на обобщении известных детерминированных решениях восстановления остаточных напряжений после процедуры упрочнения [127] и в процессе ползучести упрочненного изделия [126, 53]. Частично результаты данной главы, связанные с экспериментальными исследованиями, приведены в работе автора данной диссертации в соавторстве [102].

4.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В главах 2 и 3 исследована стохастическая природа деформации ползучести для различных материалов, в том числе и для сплава Д16Т. Понятно, что пространственная неоднородность распределения деформации ползучести естественным образом скажется и на решениях соответствующих краевых задач, в том числе и на рассматриваемых в настоящей работе задачах ползучести упрочненных цилиндрических изделий из сплава Д16Т. Целью данной главы является разработка метода решения стохастической краевой задачи ползучести для упрочненных полых цилиндрических образцов из сплава Д16Т при температуре $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ в условиях осевого растяжения. В главе 3 предложены стохастические уравнения ползучести этого материала, которые и будут использованы в дальнейшем. В силу ограниченности необходимого экспериментального материала для данного сплава в дальнейших исследованиях предполагается, что упругие деформации и деформации пластичности, возникающие после

процедуры упрочнения, являются детерминированными, так же как и геометрические параметры образцов и приложенные температурно-силовые нагрузки. Случайными будут считаться лишь деформации ползучести. Важность решения такого рода задач, во-первых, связана с необходимостью оценки одного из параметров надежности – величины остаточных напряжений в упрочненном образце в процессе релаксации вследствие ползучести, поскольку эффективность поверхностного пластического деформирования (его положительное влияние) определяется устойчивостью наведенных остаточных напряжений к температурно-силовому нагружению. Во-вторых, один из основных методов экспериментального (точнее – расчетно-экспериментального) определения остаточных напряжений в цилиндрических образцах – метод колец и полосок [31], который успешно применялся в ряде работ [82, 84, 121 и многие другие], основан на идеальном стохастически невозмущенном поле необратимых деформаций после процедуры упрочнения и после эксплуатации детали в поле рабочих нагрузок. Какова чувствительность метода к существенному разбросу данных деформации ползучести – вопрос открытый.

Решение поставленной в данной главе задачи основано на обобщении существующих детерминированных подходов и методов решения краевых задач механики упрочненных конструкций.

4.2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ПОЛЗУЧЕСТИ УПРОЧНЕННОГО ПОЛОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

Поскольку разработка метода решения стохастической краевой задачи основана на обобщении известного метода детерминированного решения, то для полного понимания существа дела изложим сначала детерминированный подход в соответствии с работами [126, 127, 53], согласно которым первый этап состоит в восстановлении полей остаточных напряжений и пластических де-

формаций после процесса поверхностного пластического упрочнения. Авторами указанных работ введено ряд гипотез:

1) окружная (q_θ) и осевая (q_z) компоненты остаточных пластических деформаций в упрочненном слое после упрочнения связаны соотношением

$$q_z(h) = \alpha q_\theta(h), \quad (4.1)$$

где h – глубина упрочненного слоя, α – феноменологический параметр анизотропии упрочнения;

2) недиагональными компонентами тензоров остаточных напряжений и пластической деформаций (в цилиндрической системе координат r, θ, z) пренебрегаем;

3) вторичных пластических деформаций в области сжатия не наблюдается.

Тогда, если из экспериментов известна эпюра остаточных напряжений $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ ($R_1 \leq r \leq R_2$) и параметр α , то остальные компоненты тензоров остаточных напряжений и деформаций в цилиндре с внутренним радиусом R_1 и внешним – R_2 вычисляются по формулам [126]:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{\text{res}} &= -\frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta^{\text{res}}(z) dz, \\ q_\theta(r) &= \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1+\alpha\mu)} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\mu}} \int_{R_1}^r z^{\frac{1+\alpha-\alpha\mu}{1+\alpha\mu}} [\sigma_r^{\text{res}}(z) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{\text{res}}(z)] dz + \\ &+ \frac{1+\mu}{E(1+\alpha\mu)} [\mu\sigma_r^{\text{res}}(r) - (1-\mu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r)], \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$q_z = \alpha q_\theta, q_r = -q_\theta(1+\alpha),$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)] \right\} dr,$$

$$\sigma_z^{\text{res}}(r) = E[\varepsilon_z^0 - q_z(r)] + \mu(\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)),$$

где $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$, $\sigma_r^{\text{res}}(r)$, $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ – компоненты тензора остаточных напряжений, q_θ , q_r , q_z – соответствующие компоненты тензора остаточных пластических деформаций, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Поскольку схема (4.2) основывается на известной зависимости $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$, которая может быть определена лишь в тонком упрочненном слое (области

сжатия), то необходимо экстраполировать эту зависимость в область растяжения. Для этого используется аппроксимация вида

$$\sigma_{\theta}^{\text{res}}(r) = \left[\sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R_2 - h^* - r)^2}{b^2}\right) \right] (r - R_1), \quad (4.3)$$

где параметры σ_0 , σ_1 , h^* и b определяются, исходя из условия самоуравновешенности эпюры $\sigma_{\theta}^{\text{res}}(r)$ и значений функции (4.3) в характерных точках. Поскольку рассматриваемые образцы из сплава Д16Т упрочнены пневмодробеструйной обработкой, то для данной изотропной процедуры упрочнения величина параметра анизотропии $\alpha = 1$ [144] и проблем с реализацией схемы (4.2) не возникает.

Используя предложенную в [126, 127] методику идентификации параметров аппроксимации (4.3) и экспериментальную эпюру распределения $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(r)$, которая получена методом колец и полосок [82, 84, 121], в диссертации Лунина В.В. [53] определены значения параметров $\sigma_0 = 12,56$ МПа, $\sigma_1 = 81,25$ МПа, $h^* = 0,05$ мм, $b = 0,402$ мм для упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т. На рис. 4.1 сплошной линией приведена экспериментальная зависимость $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(h)$ ($h = R_2 - r$ – глубина упрочненного слоя), а штриховой линией – расчетная зависимость по (4.3). Имея аналитическую зависимость $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(h)$, можно по (4.2) определить остальные компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций. Эти данные являются начальными данными для последующей задачи ползучести.

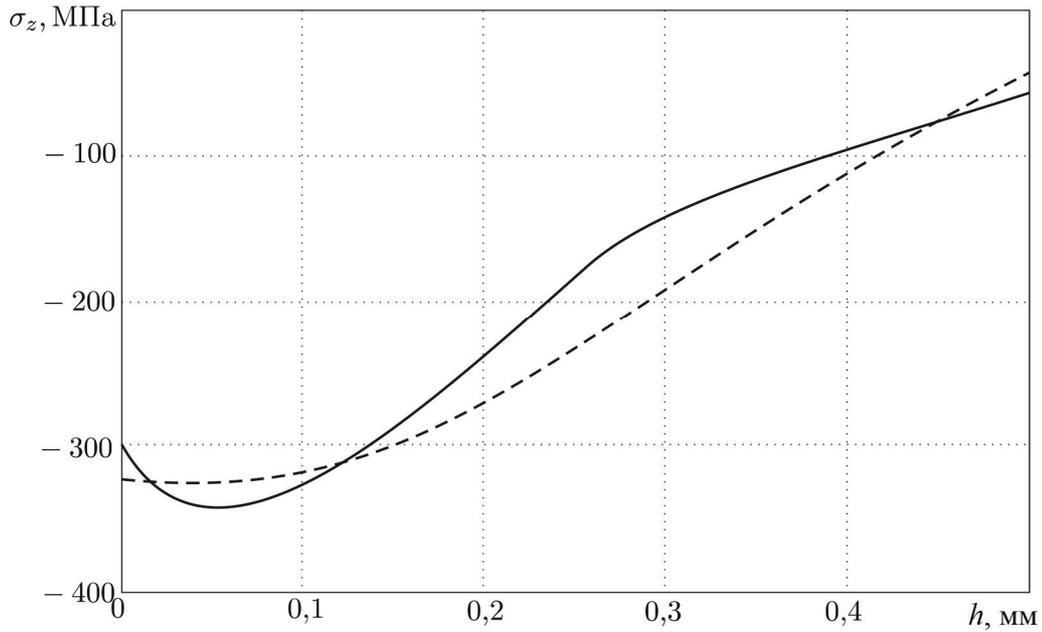


Рис. 4.1. Расчетные (штриховая линия) и экспериментальные (сплошная линия) эпюры остаточных напряжений после упрочнения в образцах из сплава Д16Т

Вторым этапом является расчет релаксации остаточных напряжений в упрочненном полем цилиндре в условиях ползучести. Дальнейшее детерминированное решение излагается в соответствии с работой [53]. Постановка краевой задачи состоит из следующих условий и уравнений:

– уравнения равновесия

$$r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} + \sigma_r(r, t) = \sigma_\theta(r, t); \quad (4.4)$$

$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_z(r, t) r dr = \frac{F(t)}{2\pi}, \quad (4.5)$$

где $\sigma_r(r, t)$, $\sigma_\theta(r, t)$, $\sigma_z(r, t)$ – радиальная, окружная и осевая компоненты тензора напряжений в полем цилиндре соответственно, $F(t)$ – приложенная к образцу растягивающая нагрузка;

– уравнение совместности деформаций

$$r \frac{d\varepsilon_\theta(r, t)}{dr} + \varepsilon_\theta(r, t) = \varepsilon_r(r, t), \quad (4.6)$$

где $\varepsilon_r(r, t)$, $\varepsilon_\theta(r, t)$ – радиальная и окружная компоненты тензора полных деформаций соответственно;

– гипотеза плоских сечений

$$\varepsilon_r(r, t) = \varepsilon_z^*(t), \quad (4.7)$$

где $\varepsilon_z(r, t)$ – осевая компонента тензора полных деформаций;

– краевые условия

$$\sigma_r(r, t)|_{r=R_1} = \mathbf{0}; \quad \sigma_r(r, t)|_{r=R_2} = \mathbf{0}. \quad (4.8)$$

Стоит заметить, в формулах (4.4), (4.6) приведены не частные, а обычные производные по пространственной переменной r , поскольку время t в компонентах тензоров напряжений и деформаций входит параметрически.

Главные компоненты тензора полной деформации $\varepsilon_i^0(r)$ ($i \equiv r, \theta, z$) представим в следующем виде:

$$\varepsilon_i^0(r) = e_i^0(r) + q_i(r), \quad (4.9)$$

где $e_i^0(r)$ – компоненты упругих деформаций. Напряженно-деформированное состояние цилиндра после процесса упрочнения (в момент времени $t = 0 - 0$) описывается остаточными напряжениями $\sigma_i^{\text{res}}(r)$ ($i \equiv r, \theta, z$), которые вычисляются на основе схемы, представленной формулами (4.2), и законом Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^0(r) &= \frac{\sigma_r^{\text{res}}(r) - \mu(\sigma_\theta^{\text{res}}(r) + \sigma_z^{\text{res}}(r))}{E} + q_r(r), \\ \varepsilon_\theta^0(r) &= \frac{\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu(\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_z^{\text{res}}(r))}{E} + q_\theta(r), \\ \varepsilon_z^0(r) &= \frac{\sigma_z^{\text{res}}(r) - \mu(\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r))}{E} + q_z(r). \end{aligned}$$

Если в момент времени $t = 0 + 0$ к цилиндру приложена продольная растягивающая сила $F_0 = \sigma_{z0}\pi(R_2^2 - R_1^2)$ (σ_{z0} – осевое («внешнее») напряжение), то будет иметь место упругий «скачок» осевых напряжений:

$$\sigma_z(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) = \sigma_z^{\text{res}}(r) + \sigma_{z0} \quad (4.10)$$

и вследствие этого – «скачок» компонент деформаций:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r^0(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) &= \frac{\sigma_r^{\text{res}}(r) - \mu(\sigma_\theta^{\text{res}}(r) + \sigma_z(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}))}{E} + q_r(r), \\
\varepsilon_\theta^0(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) &= \frac{\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu(\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_z(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}))}{E} + q_\theta(r), \\
\varepsilon_z^0(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) &= \frac{\sigma_z(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) - \mu(\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r))}{E} + q_z(r),
\end{aligned} \tag{4.11}$$

где $\sigma_z(r, \mathbf{0} + \mathbf{0})$ задается (4.10). Соотношения (4.10), (4.11) являются начальными данными для рассматриваемой краевой задачи ползучести в условиях растяжения.

Уравнения (4.4) – (4.11) замыкаются определяющими реологическими соотношениями (типа (3.1) для сплава Д16Т). Предполагается, что нагрузка F_0 такова, что дополнительные пластические деформации в цилиндре не возникают.

Выразив компоненты тензора напряжений из соответствующих уравнений, смоделируем релаксацию.

Компоненты тензора полной деформации в цилиндре, в котором в процессе процедуры упрочнения наведены поля пластических деформаций, в любой момент времени t можно представить в виде

$$\varepsilon_i(r, t) = e_i(r, t) + q_i(r) + p_i(r, t) \quad (i \equiv r, \theta, z), \tag{4.12}$$

где $e_i(r, t)$, $q_i(r)$, $p_i(r, t)$ – упругая, остаточная пластическая деформация и деформация ползучести соответственно. Для осевой компоненты ε_z из (4.7), (4.12) имеем

$$e_z(r, t) + q_z(r) + p_z(r, t) = \varepsilon_z^*(t). \tag{4.13}$$

Из закона Гука для упругих деформаций имеем

$$e_r^0(r, t) = \frac{\sigma_r(r, t) - \mu(\sigma_\theta(r, t) + \sigma_z(r, t))}{E}; \tag{4.14}$$

$$e_\theta^0(r, t) = \frac{\sigma_\theta(r, t) - \mu(\sigma_r(r, t) + \sigma_z(r, t))}{E}; \tag{4.15}$$

$$e_z^0(r, t) = \frac{\sigma_z(r, t) - \mu(\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t))}{E}. \quad (4.16)$$

При этом $\sigma_r(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) = \sigma_r^{\text{res}}$, $\sigma_\theta(r, \mathbf{0} + \mathbf{0}) = \sigma_\theta^{\text{res}}$, а $\sigma_z(r, \mathbf{0} + \mathbf{0})$ – задается (4.10).

С учетом (4.16), из (4.13) находим

$$\frac{\sigma_z(r, t) - \mu(\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t))}{E} + q_z(r) + p_z(r, t) = \varepsilon_z^*(t).$$

Выразим из последнего выражения σ_z :

$$\sigma_z(r, t) = [\varepsilon_z^*(t) - q_z(r) + p_z(r, t)]E + \mu(\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t)). \quad (4.17)$$

Исключим компоненту σ_z , вычтя из (4.14) соотношение (4.15):

$$e_r(r, t) - e_\theta(r, t) = \frac{(1 + \mu)(\sigma_r(r, t) - \sigma_\theta(r, t))}{E}. \quad (4.18)$$

С учетом уравнения равновесия (4.4) соотношение (4.18) принимает вид

$$e_r(r, t) - e_\theta(r, t) = -\frac{(1 + \mu)}{E} \left(r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} \right). \quad (4.19)$$

После дифференцирования соотношения (4.15) по r имеем:

$$\frac{de_\theta(r, t)}{dr} = \frac{1}{E} \left[\frac{d\sigma_\theta(r, t)}{dr} - \mu \left(\frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} + \frac{d\sigma_z(r, t)}{dr} \right) \right]. \quad (4.20)$$

Продифференцируем теперь (4.17) по переменной r с учетом условия $d\varepsilon_z^*(t)/dr = \mathbf{0}$ и подставим результат в (4.20). Получим:

$$\begin{aligned} \frac{de_\theta(r, t)}{dr} = \frac{1 + \mu}{E} \left[(1 - \mu) \frac{d\sigma_\theta(r, t)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} + \right. \\ \left. + \frac{\mu E}{1 + \mu} \left(\frac{dq_z(r)}{dr} + \frac{dp_z(r, t)}{dr} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Из уравнения (4.4) имеем

$$\frac{d\sigma_\theta(r, t)}{dr} = 2 \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} + r \frac{d^2\sigma_r(r, t)}{dr^2}. \quad (4.22)$$

Исключим теперь из (4.21) величину $d\sigma_\theta/dr$ с учетом (4.22):

$$\begin{aligned} \frac{de_\theta(r,t)}{dr} = \frac{1+\mu}{E} \left[r(1-\mu) \frac{d^2\sigma_r(r,t)}{dr^2} + (2-3\mu) \frac{d\sigma_r(r,t)}{dr} + \right. \\ \left. + \frac{\mu E}{1+\mu} \left(\frac{dq_z(r)}{dr} + \frac{dp_z(r,t)}{dr} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Преобразуем уравнение совместимости (4.6) с учетом (4.12) и (4.19):

$$\begin{aligned} r \frac{de_\theta(r,t)}{dr} = -\frac{1+\mu}{E} \left(r \frac{d\sigma_r(r,t)}{dr} \right) + (q_r(r) - q_\theta(r)) + \\ + (p_r(r) - p_\theta(r)) - r \left(\frac{dq_\theta(r)}{dr} + \frac{dp_\theta(r,t)}{dr} \right). \end{aligned} \quad (4.24)$$

Если подставить теперь (4.23) в (4.24), с учетом $q_z = \alpha q_\theta$, $q_r = -q_\theta(1 + \alpha)$ получим обыкновенное дифференциальное уравнение относительно σ_r :

$$r^2 \frac{d^2\sigma_r(r,t)}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r(r,t)}{dr} = g(r,t), \quad (4.25)$$

где граничные условия будут иметь вид

$$\sigma_r(r,t)|_{r=R_1} = 0; \quad \sigma_r(r,t)|_{r=R_2} = 0. \quad (4.26)$$

Здесь

$$\begin{aligned} g(r,t) = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{2+\alpha}{1+\alpha} q_r(r) + p_r(r,t) - p_\theta(r,t) - \right. \\ \left. - r \left(\frac{dp_\theta(r,t)}{dr} + \mu \frac{dp_z(r,t)}{dr} \right) + \frac{r}{1+\alpha} (1+\alpha\mu) \frac{dq_r(r)}{dr} \right]. \end{aligned} \quad (4.27)$$

С учетом граничных условий (4.26) решение уравнения (4.25) записывается следующим образом:

$$\sigma_r(r,t) = \int_{R_1}^r \frac{1}{\xi^3} \left(\int_{R_1}^{\xi} g(\eta,t) \eta d\eta \right) d\xi + \frac{C}{2} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{r^2} \right), \quad (4.28)$$

где произвольная константа C определяется из второго граничного условия (4.26):

$$C = -\frac{2R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{\xi^3} \left(\int_{R_1}^{\xi} g(\eta,t) \eta d\eta \right) d\xi.$$

Зная σ_r , из (4.4) находим σ_θ :

$$\sigma_{\theta}(r, t) = \sigma_r(r, t) + r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr}. \quad (4.29)$$

Чтобы найти $\sigma_z(r, t)$ по соотношению (4.17), требуется знать величину $\varepsilon_z^*(t)$. После подстановки (4.17) в (4.11) получаем уравнение относительно $\varepsilon_z^*(t)$, из которого следует

$$\varepsilon_z^*(t) = \frac{1}{E} \sigma_{z0} + \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \left(q_z(r) + p_z(r, t) - \frac{\mu}{E} (\sigma_r(r, t) + \sigma_{\theta}(r, t)) \right) r dr.$$

Подставляя найденное значение в (4.17), находим σ_z :

$$\sigma_z(r, t) = [\varepsilon_z^* - q_z(r) - p_z(r, t)]E + \mu[\sigma_r(r, t) + \sigma_{\theta}(r, t)]. \quad (4.30)$$

При реализации изложенной выше методики оценки релаксации остаточных напряжений при ползучести необходимо учитывать, что в начальный момент времени $t = 0 + 0$ значения напряжений определяются равенствами

$$\sigma_r(r, 0) = \sigma_r^{\text{res}}(r), \sigma_{\theta}(r, 0) = \sigma_{\theta}^{\text{res}}(r), \sigma_z(r, 0) = \sigma_z^{\text{res}}(r, 0) + \sigma_{z0},$$

где $\sigma_{z0} = \frac{F(t)}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$ – осевое напряжение, приложенное к образцу, а для деформации ползучести имеем $p_i(r, 0) = 0$ ($i \equiv r, \theta, z$).

4.3. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ПОЛЗУЧЕСТИ УПРОЧНЕННОГО ПОЛОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ИЗ СПЛАВА Д16Т В УСЛОВИЯХ ОСЕВОГО РАСТЯЖЕНИЯ. АНАЛИЗ РЕШЕНИЯ

С учетом сформулированных в пункте 4.1 ограничений, обобщение изложенного метода для детерминированной задачи заключается только во введении в постановку задачи стохастических уравнений состояния – в рассматриваемом случае стохастических уравнений ползучести (уравнения (3.4) для одноосного случая или (3.12) для сложного напряженного состояния). В связи с этим изложенная в пункте 4.2 методика изменится только в части расчета деформации ползучести, т.е. вычислении величины $g(r, t)$ в формуле (4.27). С учетом того, что расчет выполняется в цилиндрических координатах, а направ-

ления r , θ и z являются главными, стохастические уравнения состояния (3.12) в данном частном случае будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 p_j &= v_j + w_j; \\
 \dot{w}_j &= \frac{3}{2} A_2 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{m-1} \left[\frac{1}{\sigma^*} \left(\sigma_j - \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) \right) \right], \\
 \dot{v}_j(t) &= (1 + \mu_k) \beta_j(t) - \mu_k (\beta_r + \beta_\theta + \beta_z); \\
 \dot{\beta}_j &= \begin{cases} \lambda \left[A_1 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{n-1} \frac{\sigma_j}{\sigma^*} - \beta_j(t) \right], & \left[A_1 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{n-1} \frac{\sigma_j}{\sigma^*} - \beta_j(t) \right] \sigma_j > 0, \\ 0, & \left[A_1 \left(\frac{S}{\sigma^*} \right)^{n-1} \frac{\sigma_j}{\sigma^*} - \beta_j(t) \right] \sigma_j \leq 0, \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

где индекс $j = r, \theta, z$; $S = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}$ – интенсивность напряжений; A_1 и A_2 – случайные величины. Остальные параметры имеют тот же смысл, что и в (3.12).

При решении краевой задачи будем исходить из упрощенной схемы, рассмотренной в главе 3, т.е. считаем, что мы имеем достаточно длинный полый цилиндрический упрочненный стержень. Разбивая его на конечное число элементарных образцов, предполагаем, что в пределах каждого такого образца свойства деформации ползучести описываются двумя случайными величинами A_1 и A_2 , значения которых в пределах элементарного образца не изменяются. Тогда конкретные значения случайных величин A_1 и A_2 в пределах конкретного образца и определяют индивидуальность его свойств ползучести. Каждой паре значений A_1 и A_2 будет соответствовать поле остаточных напряжений, а совокупность таких полей для всего набора элементарных образцов задает спектр реализаций σ_r , σ_θ и σ_z . Применяя далее методы математической статистики, можно найти математическое ожидание, дисперсию, среднеквадратическое отклонение и другие статистические моменты функций $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$, $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ и $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$.

Таким образом, численное решение стохастической задачи сводится к конечному числу решений детерминированной краевой задачи при выбранном

количестве пар генерируемых значений случайных величин $\{A_1, A_2\}$. Выборки значений случайных величин A_1 и A_2 приведены в таблице 3.2, при этом в главе 3 установлено, что эти случайные величины некоррелированы. Это означает, что генерацию конкретных значений для A_1 и A_2 можно производить независимо друг от друга. Для того чтобы не заниматься законом распределения этих величин, при численном решении каждый раз случайным образом из таблицы 3.1 выбиралось одно значение для A_1 и одно значения для A_2 , и они использовались в решении краевой задачи.

Изложим численный метод решения задачи релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести. В начальный момент времени при $t = 0$ реализуется схема (4.2). Поскольку при дробеструйной обработке параметр аппроксимации $\alpha = 1$, то для реализации схемы (4.2) достаточно знать лишь экспериментальную эпюру $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ после процедуры упрочнения. А далее реализуется схема

$$\sigma_\theta(r) \rightarrow \sigma_r(r) \rightarrow q_\theta(r) \rightarrow q_z(r), q_r(r) \rightarrow \varepsilon_z^0 \rightarrow \sigma_z(r),$$

тем самым определяется напряженно-деформированное состояние в начальный момент времени (после процедуры упрочнения). Для расчета релаксации остаточных напряжений ($t > 0$) выполняется дискретизация по времени $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$ с шагом $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$) и дискретизация по радиусу $R_1 = r_0 < r_1 < \dots < r_{m-1} < r_m = R_2$ с шагом $\Delta r = r_{i+1} - r_i$, и далее решается задача известным методом «шагами» по времени. Сначала при $t = t_i$ вычисляются приращения деформаций ползучести $\Delta P_r(r_i, t_j)$, $\Delta P_\theta(r_i, t_j)$, $\Delta P_z(r_i, t_j)$ по известным напряжениям $\sigma_r(r_i, t_j)$, $\sigma_\theta(r_i, t_j)$ и $\sigma_z(r_i, t_j)$ интегрированием уравнений (3.20) методом Эйлера на шаге времени Δt . Затем вычисляются значения деформации ползучести в момент времени $t = t_{i+1}$ по формулам

$$P_\omega(r_i, t_{j+1}) = P_\omega(r_i, t_j) + \Delta P_\omega(r_i, t_j), \omega = r, \theta, z.$$

Следующий этап состоит в вычислении функции $g(r_i, t_{j+1})$ по формуле (4.27), при этом для производных $\frac{dP_\theta}{dr}$, $\frac{dP_z}{dr}$ и $\frac{dP_r}{dr}$ используются конечно-разностные аппроксимации вида

$$\frac{dP_\omega(r_i, t_{j+1})}{dr} \approx \frac{P_\omega(r_{i+1}, t_{j+1}) - P_\omega(r_i, t_{j+1})}{\Delta r}, \omega = r, \theta, z.$$

Дальнейший алгоритм состоит в выполнении следующих операций:

1) рассчитывается величина $\sigma_r(r_i, t_j)$ по формуле (4.28), при этом для вычисления интегралов используется вторая формула прямоугольников, тем самым исключается особенность $\frac{1}{\xi^3}$ в точке $\xi = 0$;

2) вычисляется величина $\sigma_\theta(r_i, t_j)$ по формуле (4.29), при этом используется аппроксимация производной $\frac{d\sigma_r(r_i, t_{j+1})}{dr}$ через конечные разности (аналогично производной от деформации ползучести);

3) далее вычисляется величина $\varepsilon_z^*(t_{j+1})$, потом по (4.30) рассчитывается $\sigma_z(r_i, t_{j+1})$ и алгоритм повторяется для следующего значения времени $t = t_{j+2}$.

В конце интервала при $t = t_{j+1}$ происходит упругая догрузка напряжений.

Конкретная вычислительная реализация изложенного метода выполнялась с использованием разработанных в Самарском государственном техническом университете программных комплексов [176, 177], которые дополнены модулями генерации случайных величин и статистической обработки массивов данных для остаточных напряжений в любой момент времени расчета.

Рассмотрим и проанализируем результаты расчета. В качестве примера рассмотрим вариант растяжения упрочненного образца осевой нагрузкой (осевым напряжением) $\sigma_{z0} = 353$ МПа. Для каждого расчета генерировалось по $T = 34$ реализаций пар случайных величин $\{A_1, A_2\}$ (по числу реализаций в таблице 3.2). На рис. 4.2 в качестве примера приведены в области сжатия полученные в результате решения краевых задач при конкретных значениях величин A_1 и A_2 34 реализации для остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ при $t = 10$ ч, а на

рис. 4.3 – при $t = 100$ ч. Для сравнения здесь же (на рис. 4.3) жирной сплошной линией приведена полученная на основе метода колец и полосок осредненная экспериментальная зависимость для напряжения $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$. Как следует из представленных на рис. 4.2 и 4.3 графиков, во-первых, наблюдается значительная релаксация остаточных напряжений, а во-вторых, наблюдается существенный разброс значений остаточных напряжений между реализациями, который необходимо учитывать в инженерных прикладных задачах. Так, например, при $t = 10$ ч напряжения на поверхности, т.е. при $\sigma_z = \sigma_z(R_2, t)$, принимают значения от -288 МПа до -52 МПа, а при $t = 100$ ч минимальное значение составляет -277 МПа, а максимальное – -38 МПа. Здесь наглядно видно, что интервал изменения напряжения на поверхности достаточно большой. Аналогичная картина наблюдается и для компоненты окружного напряжения $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$.

Поскольку в результате расчетов информация, аналогичная представленной на рис. 4.2 и рис. 4.3, имеется для любого момента времени и для всех компонент тензора остаточных напряжений, то можно построить доверительные интервалы как для распределения каждой из компонент тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя при любом фиксированном значении времени, так и для любой компоненты тензора напряжений в конкретной точке упрочненного слоя во времени при заданном значении вероятности (в дальнейшем будем исходить из нормального закона распределения для всех анализируемых случайных функций остаточных напряжений). На рис. 4.4 – 4.7 приведены доверительные интервалы для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ по глубине упрочненного слоя, когда растягивающая нагрузка σ_{z0} принимает значения {353; 386; 406,2 и 420} МПа в моменты времени 10, 50 и 100 ч. Доверительные интервалы построены с вероятностью $p = 0,99$.

Следует отметить, что на рис. 4.4 – 4.7 представлены именно остаточные напряжения без учета «рабочего» напряжения σ_{z0} . Другими словами, это распределение остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h, t)$ в фиксированные моменты времени после ползучести и осевой разгрузки цилиндрического образца.

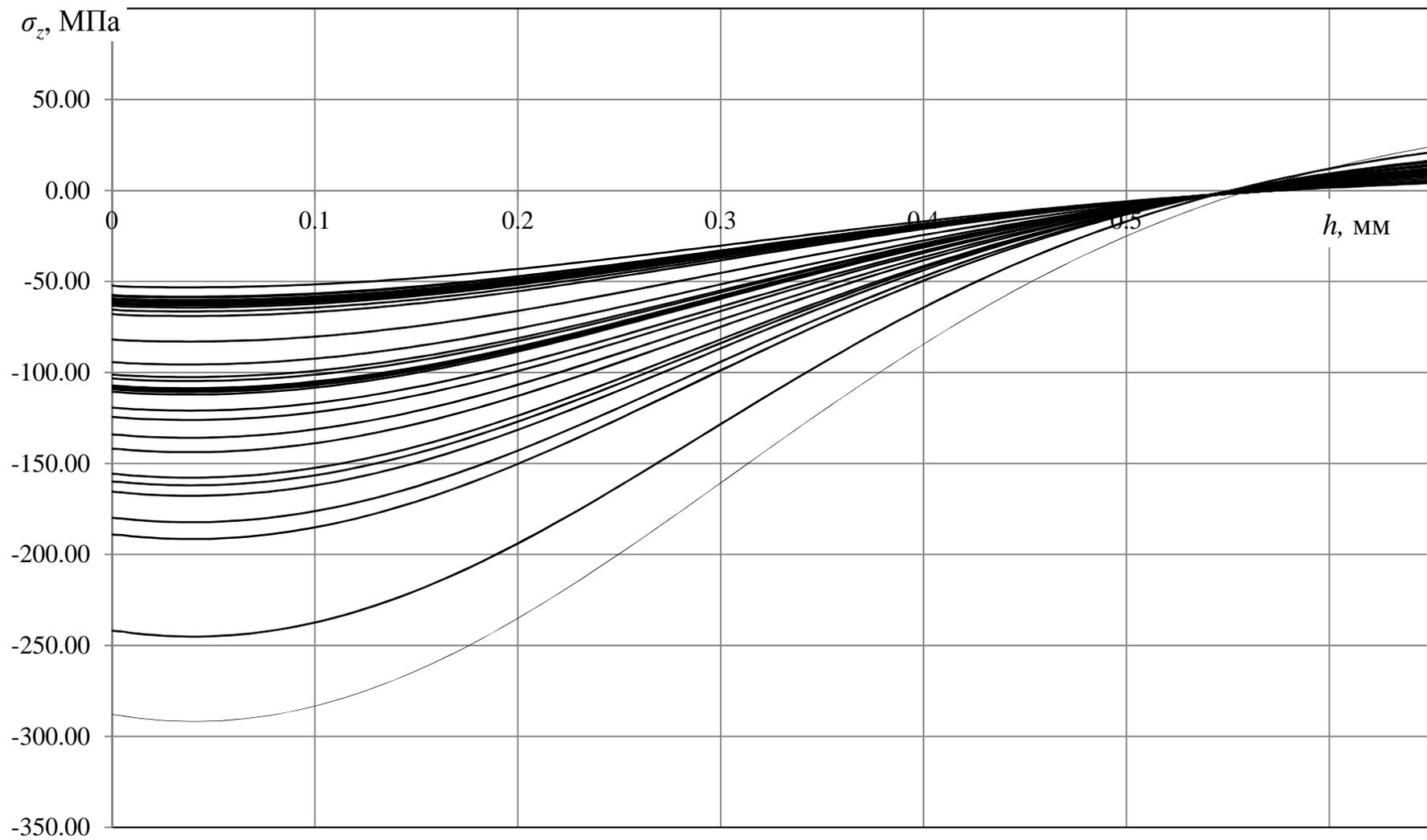


Рис. 4.2. Расчетные случайные реализации напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ в процессе ползучести при осевом растяжении $\sigma_{z0} = 353 \text{ МПа}$ в момент времени $t = 10$ часов

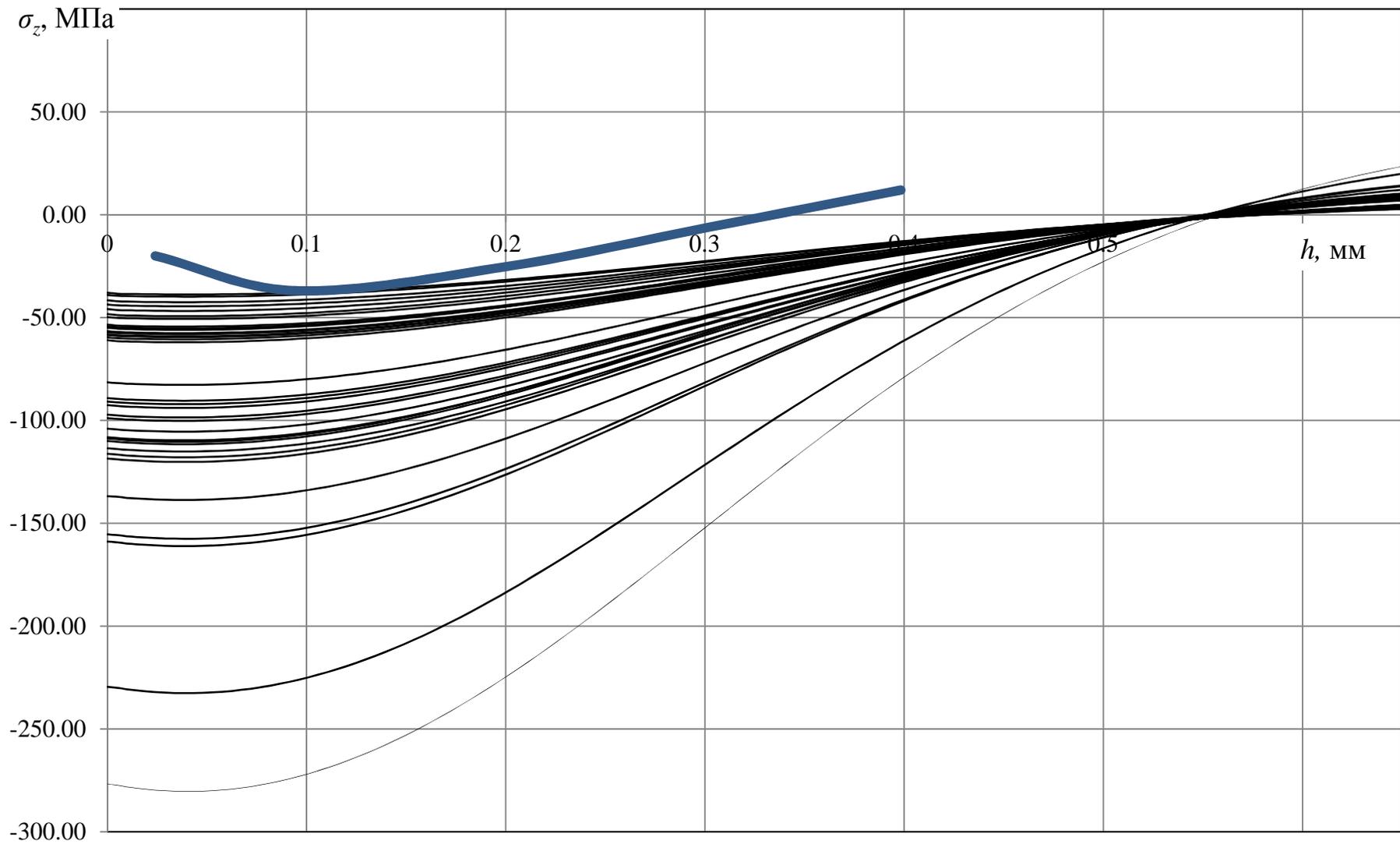


Рис. 4.3. Расчетные случайные реализации напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ в процессе ползучести при осевом растяжении

$\sigma_{z0} = 353 \text{ МПа}$ в момент времени $t = 100$ часов

Выполним анализ полученных численных результатов. Если ориентироваться на модули остаточных напряжений, то из сравнения графиков остаточных напряжений после процедуры упрочнения (рис. 4.1) и после ползучести и полной разгрузки образца (рис. 4.4 – 4.7), видим, что нижняя граница доверительного интервала для остаточного напряжения $\sigma_z = \sigma_z(R_2, t)$ (сплошные линии на рис. 4.4 – 4.7) существенно эволюционировала. Как следует из рис. 4.4, в, при $\sigma_{z0} = 353$ МПа нижнее значение напряжения $\sigma_z = \sigma_z(R_2, 100)$ (а именно оно интересно с точки зрения прочностных расчетов) уменьшилось (по модулю) по сравнению с аналогичным напряжением после процедуры упрочнения (см. рис. 4.1) почти в 4 раза; для $\sigma_{z0} = 385$ МПа при $t = 100$ ч – более чем в 7 раз (см. рис. 4.5, в); для $\sigma_{z0} = 406,2$ МПа – почти в 9 раз (см. рис. 4.6, в), а для $\sigma_{z0} = 420$ МПа – почти на порядок (см. рис. 4.7, в). Таким образом, можно констатировать, что произошла существенная релаксация остаточных напряжений, причем с увеличением величины растягивающей нагрузки σ_{z0} наблюдается существенное увеличение скорости релаксации остаточных напряжений, а это свидетельствует об отрицательном влиянии растягивающей нагрузки на устойчивость (способность сохраняться) остаточных напряжений, наведенных в процессе упрочнения, к силовым растягивающим нагрузкам.

В заключении отметим, каким образом решалась задача выбора шага интегрирования по времени Δt и проблема устойчивости численного метода «шагов по времени».

Поскольку при ползучести наибольшая скорость изменения деформации ползучести и напряжений наблюдается на первом шаге дискретизации Δt и за этот интервал времени происходит максимальная скорость релаксации напряжений, то достаточно подобрать необходимый шаг дискретизации на первой итерации. Поэтому в соответствии с правилом Рунге расчеты на первой итерации выполнялись с шагами Δt и $\Delta t/2$ и сравнивались значения напряжений в одних и тех же узлах (r_i, t_j) . Если максимальный модуль разности между напряжениями по всем узлам (для всех трех компонент $\sigma_k = \sigma_k(r_i, t_j)$, $k = r, \theta, z$)

меньше заложенной в расчетах погрешности (в настоящей работе величина погрешности $\delta = 0.1$ МПа), то в качестве шага по времени берется величина $\Delta t/2$. Если это условие не выполняется, то шаг уменьшается еще в 2 раза и процедура повторяется. После выбора шага дискретизации выполняется решение задачи уже «шагами по времени». Вопросы сходимости контролировались сравнением численных методов с асимптотическим поведением конструкции при $t \rightarrow +\infty$, когда начальными пластическими деформациями, упругими деформациями и вязкопластической компонентой деформации ползучести v_j ($j = r, \theta, z$) можно пренебречь, поскольку поведение на бесконечности определяется только деформацией вязкого течения (деформацией на стадии установившейся ползучести). В этом предельном случае должны выполняться условия $\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_z(r, t) = \sigma_{z0}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_\theta(r, t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_r(r, t) = \mathbf{0}$, где σ_{z0} – это приложенное к образцу растягивающее напряжение. Поэтому расчеты выполнялись для больших времен и действительно численные решения асимптотически приближались к теоретическим при всех четырех нагрузках.

В постановке задач данной главы (пункт 4.1) отмечалось, что по разбросу данных по ползучести и степени релаксации остаточных напряжений можно сделать выводы о чувствительности метода колец и полосок к неоднородности распределения деформации ползучести вдоль упрочненного образца, так как в этом методе результаты существенно зависят от места вырезки кольца в соответствующей втулке.

Для этого проанализируем результаты экспериментального определения остаточных напряжений по методу колец и полосок после ползучести для образцов из сплава Д16Т ($T = 125$ °С) при действии растягивающего напряжения $\sigma_{z0} = \{353; 386; 406,2 \text{ и } 420\}$ МПа при длительности испытаний $\{100; 162; 166; 83\}$ ч соответственно. Соответствующие экспериментальные данные опубликованы в работе [102] с участием автора настоящей диссертации. Распределения осевых σ_z и окружных σ_θ остаточных напряжений по толщине h упрочненного слоя всех образцов представлены на рис. 4.8.

Из представленных на рис. 4.8 распределений осевых σ_z и окружных σ_θ остаточных напряжений после ползучести под действием растягивающей осевой нагрузки видно, что по сравнению с исходным распределением после ПДО (сплошная линия на рис. 4.1) происходит существенное изменение остаточных напряжений (качественное и количественное). Результатом приложенной нагрузки стала существенная релаксация остаточных напряжений и изменение характера их распределения.

Анализ экспериментальных зависимостей остаточных напряжений в упрочненном слое образцов после ползучести под нагрузкой свидетельствует, что их величина оказалась почти на порядок меньше соответствующих величин сразу после процесса упрочнения дробью. Это подтверждается и расчетными данными (см. рис. 4.4 – 4.7). Поэтому с учетом разброса данных деформации ползучести по длине образцов, который естественным образом влияет и на определение остаточных напряжений, можно считать (в первом приближении), что приложенная осевая нагрузка в диапазоне от 353 до 420 МПа приводит к практически полной релаксации остаточных напряжений в полых упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т при температуре 125 °С в течение 100–160 часов.

Вообще говоря, полученные экспериментальные данные противоречивы. Из их анализа и анализа расчетных данных (рис. 4.4 – 4.7) можно сделать некоторые выводы о чувствительности метода колец и полосок к двум факторам: разброс данных и практически полная релаксация остаточных напряжений (их малая (по модулю) величина после ползучести по сравнению с исходным распределением после ПДО). По всей видимости, в этих условиях применять метод колец и полосок проблематично. Он хорошо «работает», если величины остаточных напряжений составляют, во-первых, несколько сотен МПа, а во-вторых, неоднородность неупругих деформаций незначительна.

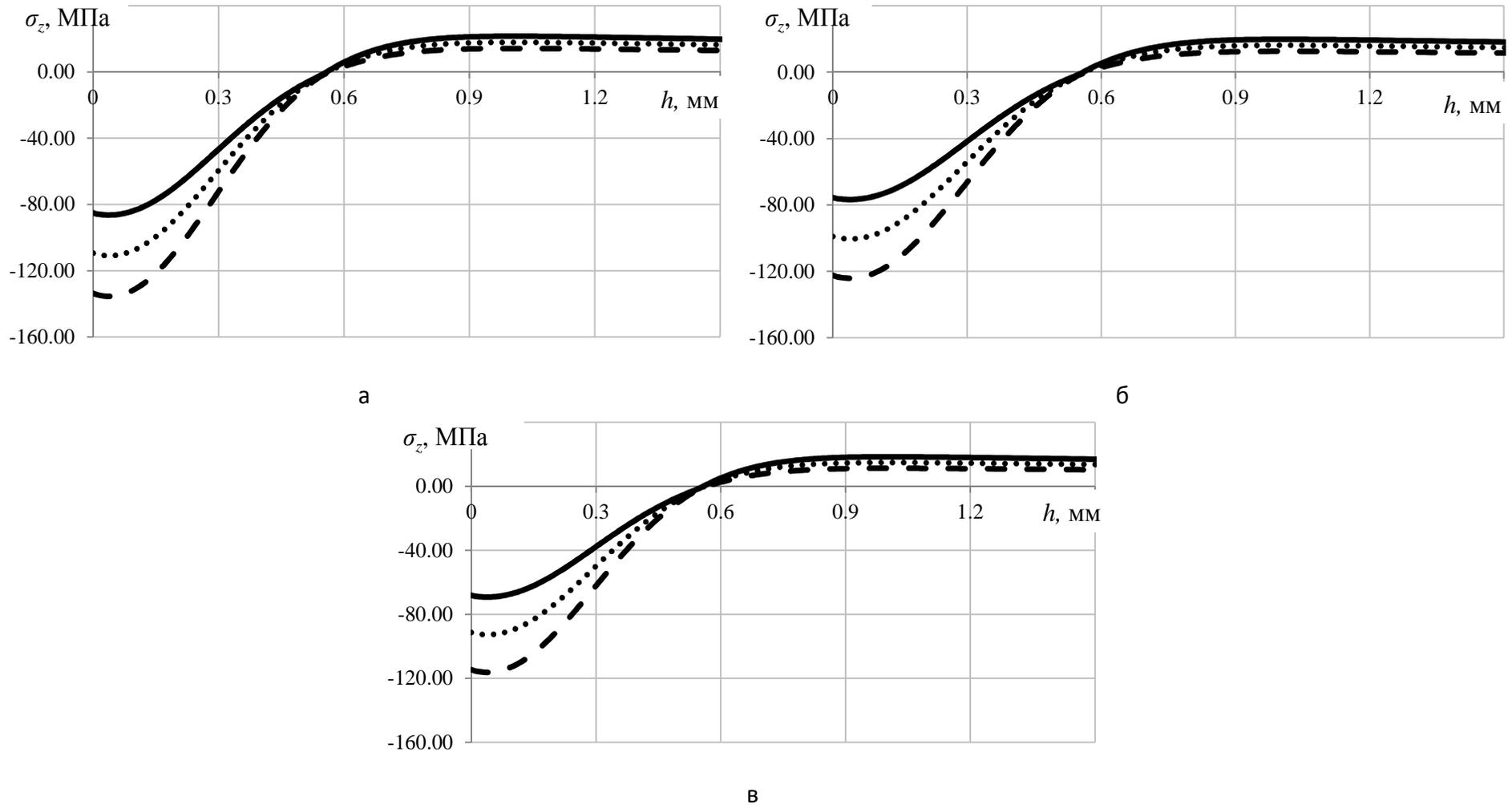
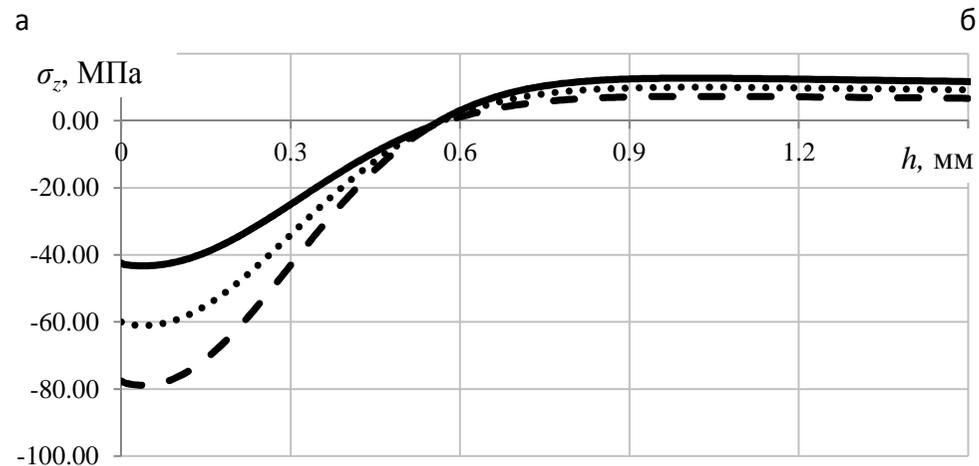
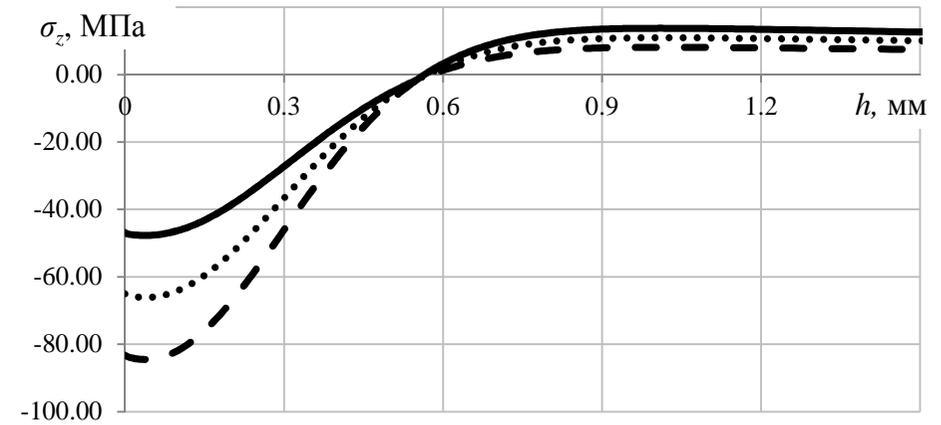
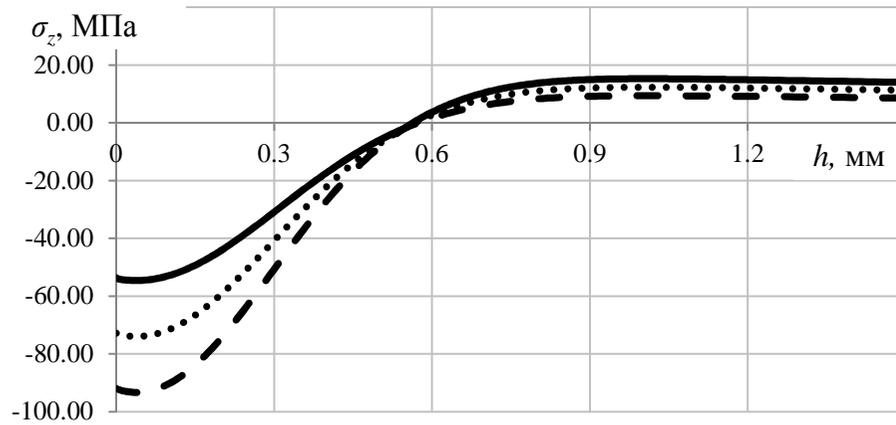


Рис. 4.4. Расчетные доверительные интервалы для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (доверительная вероятность $p = 0,99$) при растягивающей нагрузке $\sigma_{z0} = 353$ МПа в различные моменты времени: а – $t = 10$ ч; б – $t = 50$ ч; в – $t = 100$ ч. Сплошная и штриховая линии – верхняя и нижняя границы; пунктирная линия – математическое ожидание

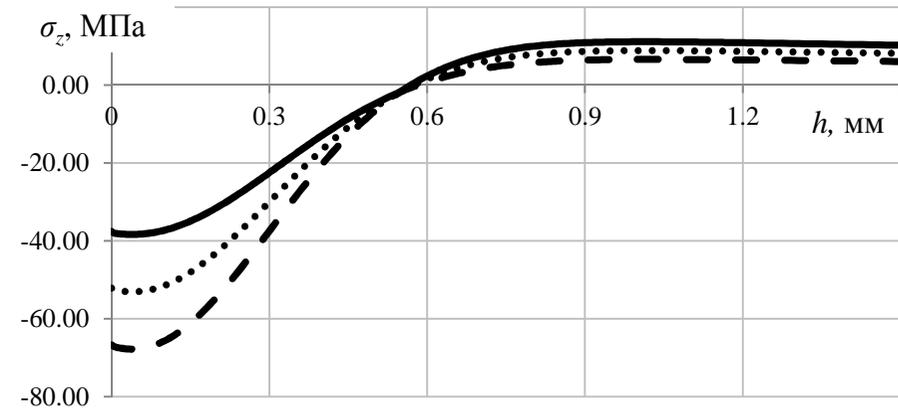
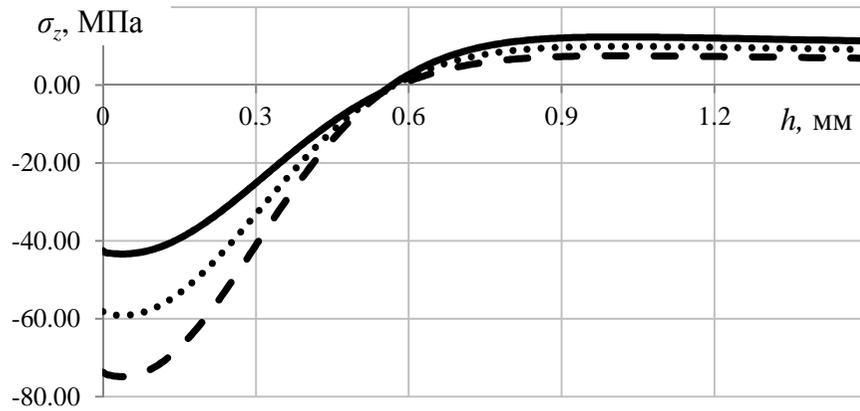


в

Рис. 4.5. Расчетные доверительные интервалы для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (доверительная вероятность $p = 0,99$) при растягивающей нагрузке $\sigma_{z0} = 385$ МПа в различные моменты времени:

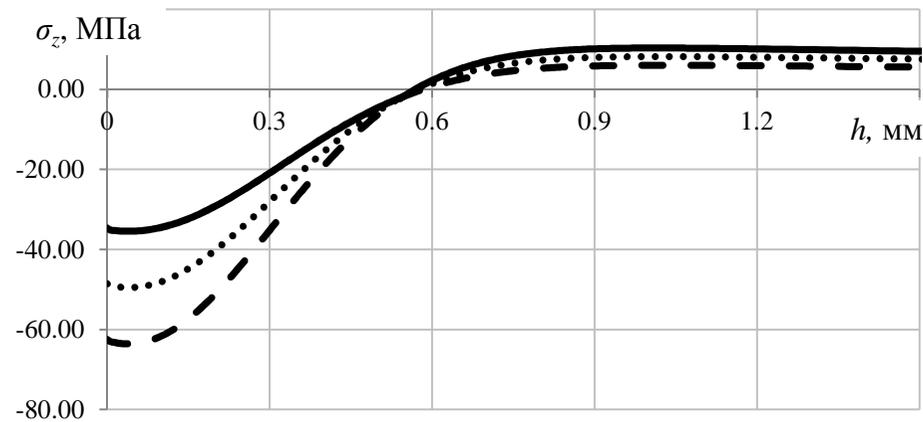
а – $t = 10$ ч; б – $t = 50$ ч; в – $t = 100$ ч. Сплошная и штриховая линии – верхняя и нижняя границы; пунктирная линия

– математическое ожидание



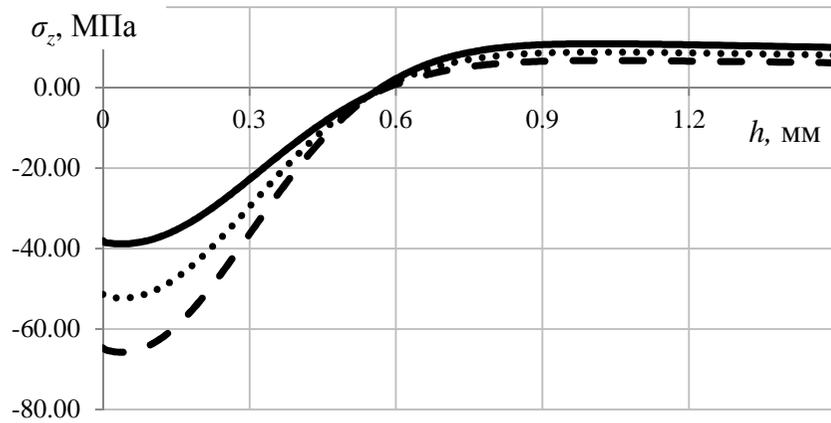
а

б

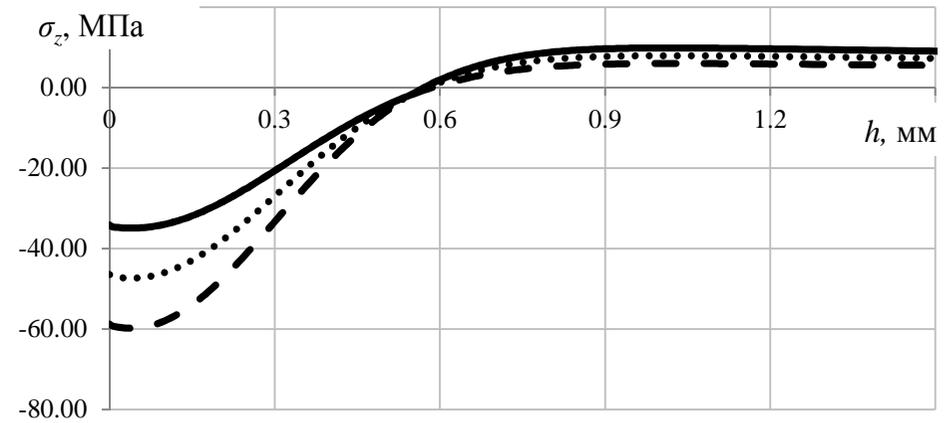


в

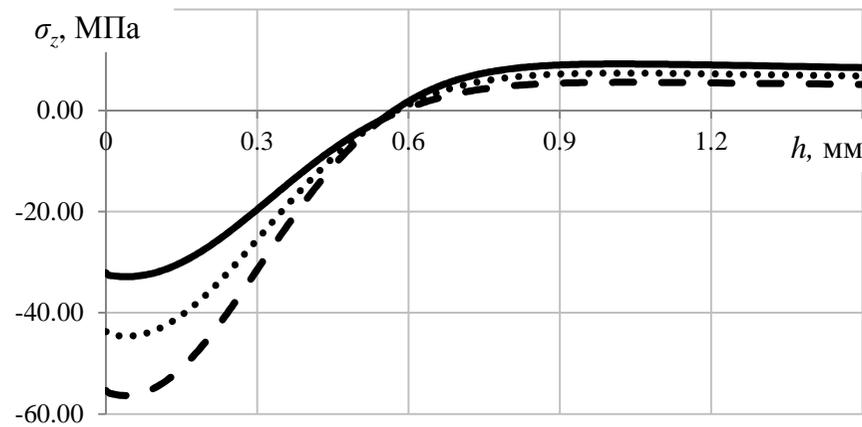
Рис. 4.6. Расчетные доверительные интервалы для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (доверительная вероятность $p = 0,99$) при растягивающей нагрузке $\sigma_{z0} = 406,2$ МПа в различные моменты времени: а – $t = 10$ ч; б – $t = 50$ ч; в – $t = 100$ ч. Сплошная и штриховая линии – верхняя и нижняя границы; пунктирная линия – математическое ожидание



а



б



в

Рис. 4.7. Расчетные доверительные интервалы для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (доверительная вероятность $p = 0,99$) при растягивающей нагрузке $\sigma_{z0} = 420$ МПа в различные моменты времени: а – $t = 10$ ч; б – $t = 50$ ч; в – $t = 100$ ч. Сплошная и штриховая линии – верхняя и нижняя границы; пунктирная линия – математическое ожидание

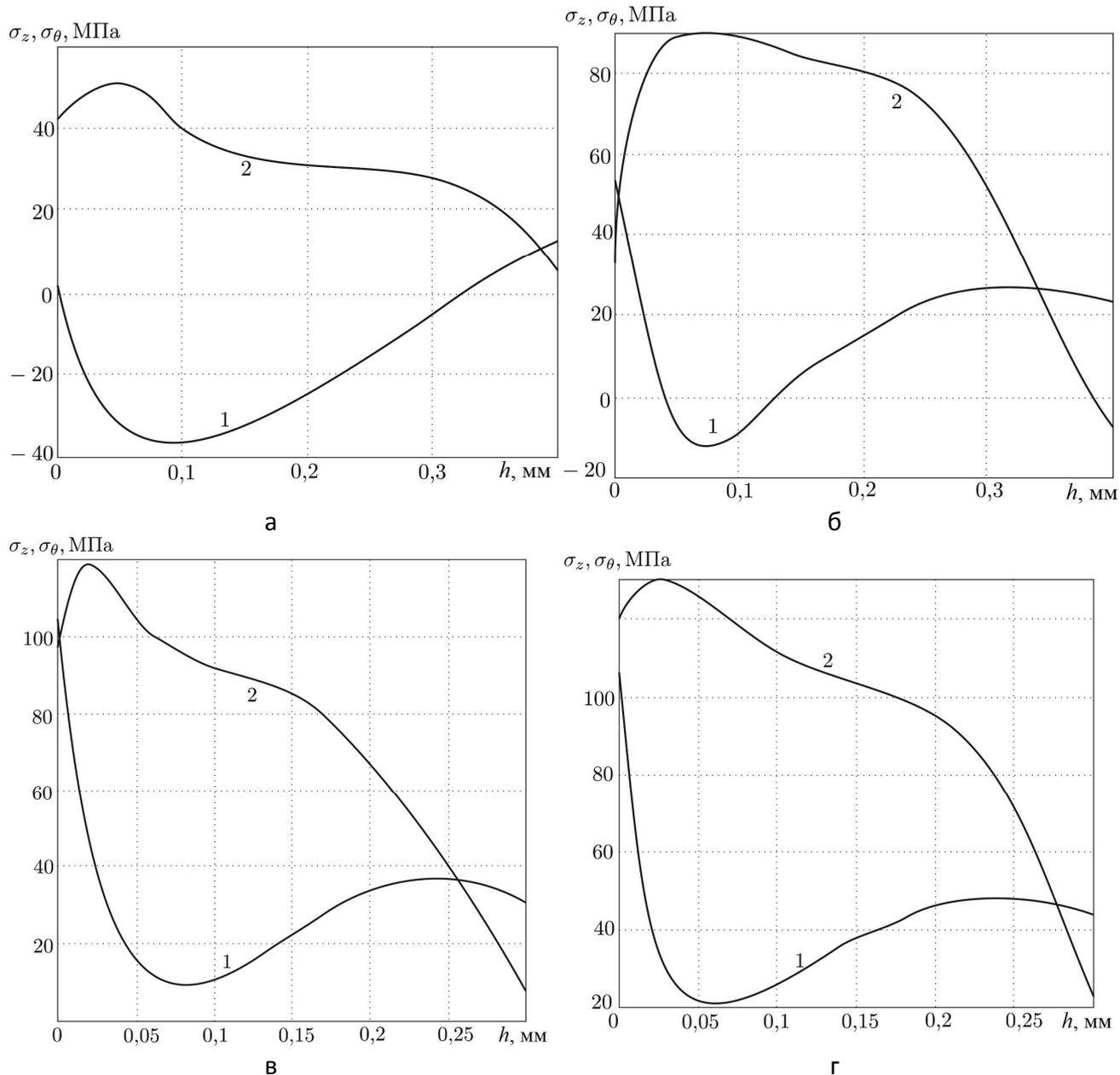


Рис. 4.8. Экспериментальные значения осевых σ_z (1) и окружных σ_θ (2) остаточных напряжений в цилиндрических образцах из сплава Д16Т после испытаний на ползучесть: а – образец № 1 ($\sigma_{z0} = 353$ МПа); б – образец № 2 ($\sigma_{z0} = 385$ МПа); в – образец № 3 ($\sigma_{z0} = 406,2$ МПа); г – образец № 4 ($\sigma_{z0} = 420$ МПа)

Тем не менее, полученные экспериментальные результаты являются важными с прикладной точки зрения. Во-первых, они характеризуют степень устойчивости наведенных остаточных напряжений в цилиндрических полых изделиях из сплава Д16Т к осевым силовым нагрузкам, а, например, трубы из

этого сплава широко применяются в нефтяной промышленности. Во-вторых, в существующих теориях прогнозирования характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей основополагающей концепцией является факт прямого влияния наведенных остаточных напряжений на приращение предела сопротивления усталости элементов конструкций [82, 83, 84], поэтому учет кинетики остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести является одним из инструментов уточнения соответствующих расчетных методик.

Действительно, если имеется информация об остаточных напряжениях в стохастической постановке, то тогда и теории влияния остаточных напряжений на предел выносливости можно придать стохастический характер. Согласно [82, 83] приращение предела выносливости цилиндрических деталей Δp_R задается формулой:

$$\Delta p_R = \overline{\Psi}_p |\bar{\sigma}_{ост}|,$$

где $\overline{\Psi}_p$ – феноменологический параметр, зависящий от геометрических параметров детали, материала детали, характера нагружения; а величина $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется соотношением

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\varepsilon) d\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}},$$

где $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon)$ – осевые остаточные напряжения по глубине слоя; $\varepsilon = \frac{y}{t_{кр}}$ – безразмерная глубина упрочненного слоя, выраженная в долях $t_{кр}$. Через $t_{кр}$ обозначается максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости (феноменологический параметр). Поэтому, если величина $\sigma_z(\varepsilon)$ в каждый момент времени задана как случайный процесс, т.е. известны ее статистические моменты первого и второго порядков (математическое ожидание и дисперсия), то величина $\bar{\sigma}_{ост}$ также может быть оценена в статистическом аспекте. Следовательно, и величина Δp_R в конечном итоге будет случайной величиной и можно рас-

считать, например, доверительные интервалы для математического ожидания и естественным образом выйти на параметры надежности для оценки многоцикло-вой усталости упрочненных деталей. Напрямую указанный подход может быть применен для оценки влияния предварительной ползучести упрочненного изделия (в том числе, в условиях термоэкспозиции) на изменение предела сопротивления усталости при последующем нагружении в условиях многоцикло-вой усталости.

4.4. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4

1. Разработана методика численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий, реализованная для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения при температуре $T = 125$ °С. Исследована релаксация остаточных напряжений и впервые получены статистические оценки для полей остаточных напряжений в процессе ползучести в различные моменты времени.

2. Исследовано влияние растягивающей осевой нагрузки на процесс релаксации остаточных напряжений в упрочненном образце из сплава Д16Т в стохастической постановке. Установлено, что если ориентироваться на нижнюю границу разброса для осевой компоненты остаточных напряжений σ_z , то при осевой нагрузке в 355 МПа за 100 часов максимальная величина σ_z по модулю уменьшилась в 4 раза; при 385 МПа – более чем в 7 раз; при 406,2 МПа – почти в 9 раз; при 420 МПа – почти на порядок. Полученные результаты свидетельствуют о крайне отрицательном влиянии растягивающей нагрузки на устойчивость (способность сохраняться) остаточных напряжений в образцах из сплава Д16Т в исследуемом температурно-силовом диапазоне внешних нагрузок.

3. Даны рекомендации по использованию метода колец и полосок для экспериментального определения остаточных напряжений в цилиндрических изделиях после длительных температурно-силовых выдержек в условиях есте-

ственного разброса деформации ползучести, а также указано на возможность использования стохастических полей остаточных напряжений при оценке предела сопротивления усталости в условиях ползучести.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК, ПОЛЗУЧЕСТИ И МНОГОЦИКЛОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА КИНЕТИКУ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЁННЫХ ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Результаты данной главы излагаются в соответствии с работами автора диссертации [15-19, 59-69, 71, 73, 74, 81, 106, 107, 109, 110, 112, 115, 117-119, 154].

5.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из предыдущих глав следует, что суть поверхностного пластического упрочнения изделий состоит в повышении их ресурса и работоспособности. В частности, повышается сопротивление усталости упрочненных деталей за счет создания поля сжимающих остаточных напряжений в тонком упрочненном слое. Однако остаточные напряжения – не единственный показатель «качества» поверхностного слоя. Важную роль играют и показатели шероховатости, микротвердости, а также вид технологии механической обработки деталей и последующей процедуры поверхностно пластического упрочнения поверхности детали (в данной диссертации рассматривается пневмодробеструйная обработка поверхности микрошариками) и ее технологических параметров. Вызывает интерес связь всех вышеперечисленных параметров «качества» поверхностного слоя до и после процедуры упрочнения, а также их кинетика в поверхностно упрочненных плоских и цилиндрических образцах в условиях высокотемпературной ползучести или в процессе многоциклового нагружения.

Поэтому в данной главе анализируются такие характеристики поверхностного слоя упрочненных и неупрочненных плоских и цилиндрических образцов, как шероховатость и микротвердость, а также исследуется влияние высокотемпературных нагрузок в условиях ползучести и многоцикловых испытаний на их кинетику.

5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ПОВЕРХНОСТНО ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ И МНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА ЭИ698ВД

Для выполнения поставленной задачи анализу подвергались образцы из сплава ЭИ698 I и II типов. Внешний вид образцов представлен на рис. 5.1, рис. 5.2, а. Геометрические размеры образца типа I приведены в подрисуночной подписи к рис. 5.1, а, а размеры образца II типа – на рис. 5.2, б.

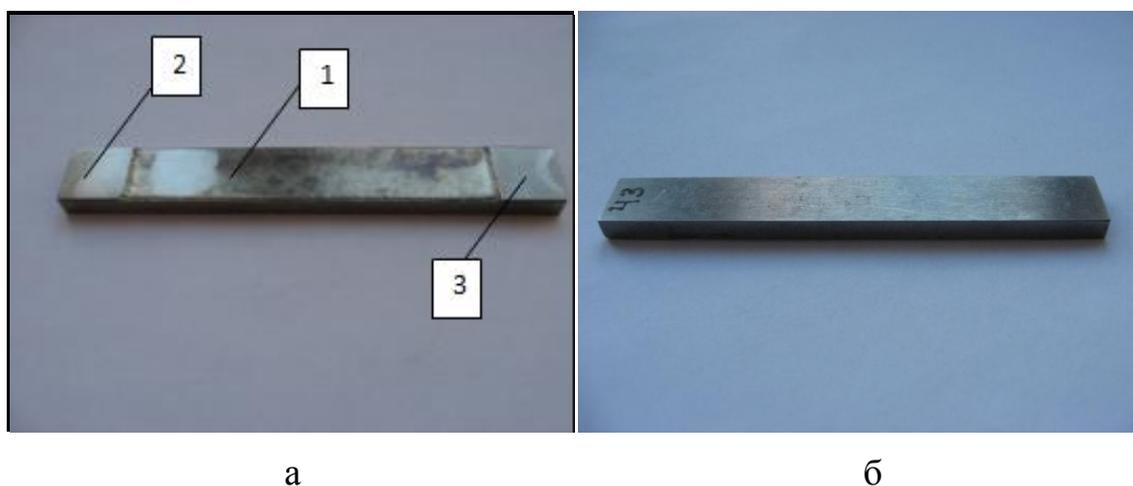


Рис. 5.1. Внешний вид исследуемых образцов типа I с упрочненной (а) и неупрочненной (б) сторонами. Длина образца – 60 мм; ширина - 8 мм; высота – 3 мм

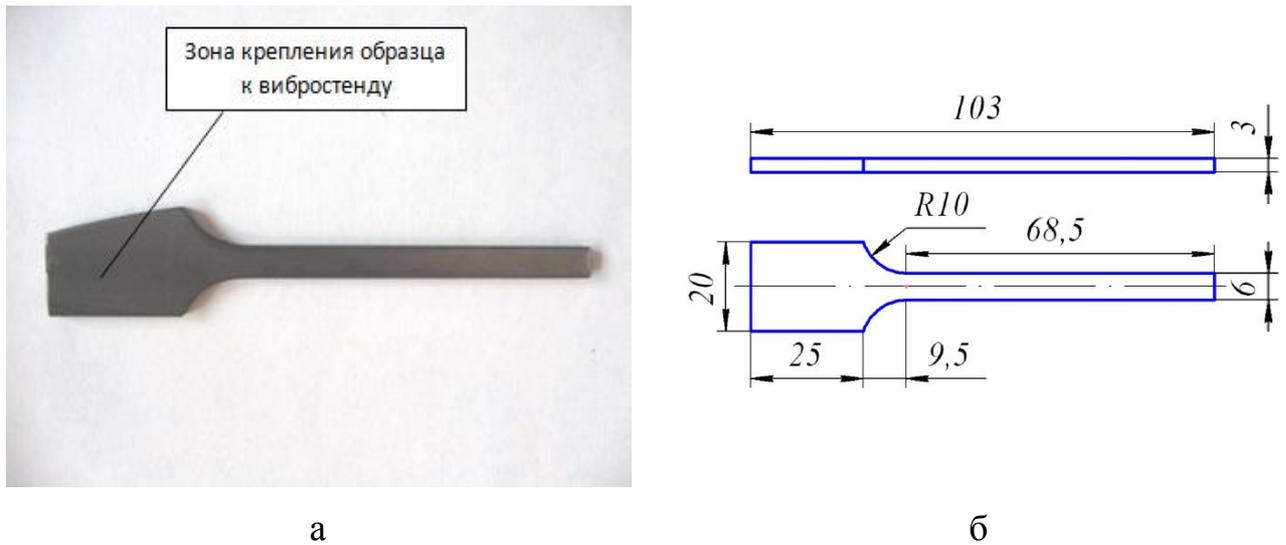


Рис. 5.2. Внешний вид исследуемых образцов типа II

Образцы типа I использовались для исследования влияния механической обработки и упрочнения ППД на характеристики шероховатости и микротвердости, а образцы II типа – для исследования многоцикловых нагрузок при изгибе на эти же параметры. Отметим, что исследование полей остаточных напряжений для этих образцов и влияния ПДО на повышение предела выносливости выполнено В.Ф. Павловым с соавторами, и соответствующие результаты приведены в монографии [83]. Затем автором настоящей диссертационной работы были выполнены дополнительные исследования для образцов этой же партии по параметрам шероховатости и микротвердости.

Рассмотрим методику экспериментального исследования образцов обоих типов.

Образцы типа I для определения остаточных напряжений после шлифования с одной стороны подвергались упрочнению стеклянными и стальными шариками при различных давлениях воздуха p , а вторая сторона не упрочнялась и исследовалась непосредственно после шлифования. Режимы упрочняющей обработки приведены в таблице 5.1. Упрочненная сторона разбивалась на 3 зоны (см. рис. 5.1, а). Для того чтобы выяснить, как влияет упрочненный слой и наведенные остаточные напряжения на характеристики шероховатости и мик-

ротвердости, зона 1 была подвергнута травлению электрополированием на глубину 125-288 мкм (см. последний столбец таблицы 5.1), а зоны 2 и 3 не подвергались электрополировке. Глубина травления обусловлена тем, что глубина залегания остаточных напряжений сжатия составляет величину порядка 100-200 мкм, что следует из графиков, представленных на рис. 5.22 в монографии [83]. Другими словами, в зоне 1 мы имеем свойства поверхности исходного (уже не упрочненного) материала после электрополирования, и в дальнейшем эти характеристики сравнивались с аналогичными на неупрочненной поверхности (см. рис. 5.1, б) после механической обработки шлифованием.

Таблица 5.1

Исходные характеристики образцов типа I

№ режима	Тип дробы	P возд. (Ат)	№ образца	Глубина стравленного слоя для образца, мкм
1	Стеклянные шарики, диаметр 212 – 300 мкм	2	17	127,16
2		3	48	125,186
3		4	55	150,566
4	Стальная дробь, диаметр 180 – 500 мкм	1,5	50	166,48
5		3	43	179,114
6		4,5	53	228,98
7		6	27	225,85
8	Без упрочнения		59	130,069

Схема испытаний образцов типа II была другой. Поверхность образцов данного типа (см. рис. 5.2, а) полностью упрочнялась в режиме пневмодробеструйной обработки также стеклянными и стальными шариками, причем режимы упрочнения образцов типа I и II совпадают. Отметим, что при обработке поверхности стеклянными шариками и стальной дробью образцы приобрели различную окраску (см. рис. 5.3). После упрочнения образцы типа II подвергались испытаниям на усталость при изгибе на вибростенде. В таблице 5.2 приведены основные сведения по упрочнению, характеру усталостных испытаний и вели-

чине предела выносливости. Результаты для предела выносливости упрочненных и неупрочненных образцов II типа приведены в монографии [83], в частности, для неупрочненных образцов величина $\sigma_{-1} = 332,9$ МПа. Сравнивая величины σ_{-1} для упрочненных образцов (последний столбец таблицы 5.2) с аналогичной величиной для неупрочненного образца, имеем существенное увеличение предела выносливости для упрочненных образцов.

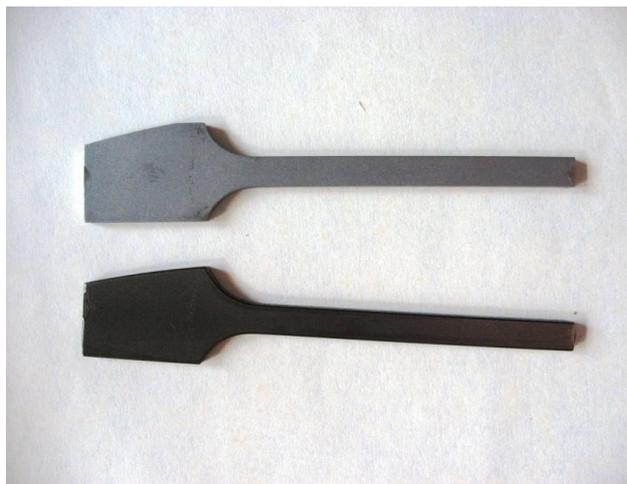


Рис. 5.3. Внешний вид образцов при обработке стеклянными шариками (верхний образец) и стальной дробью (нижний образец)

Первый этап работы заключался в проведении макроскопического анализа поверхности образцов. Макроскопический анализ показал, что образцы типа 1 и 2, обработанные как стеклянными шариками, так и стальной дробью, имеют достаточно ровную, гладкую поверхность. Особое внимание следует обратить на образец № 32 (режим обработки см. в таблице 5.2), который имеет хорошо заметную трещину в месте перехода от зоны крепления к вибростенду к зоне усталостных испытаний (рис. 5.4).

Следующий этап настоящей диссертационной работы для образцов обоих типов состоял в измерении микротвердости поверхностного слоя. Методика измерения микротвердости подробно описана в разделе 2.3.

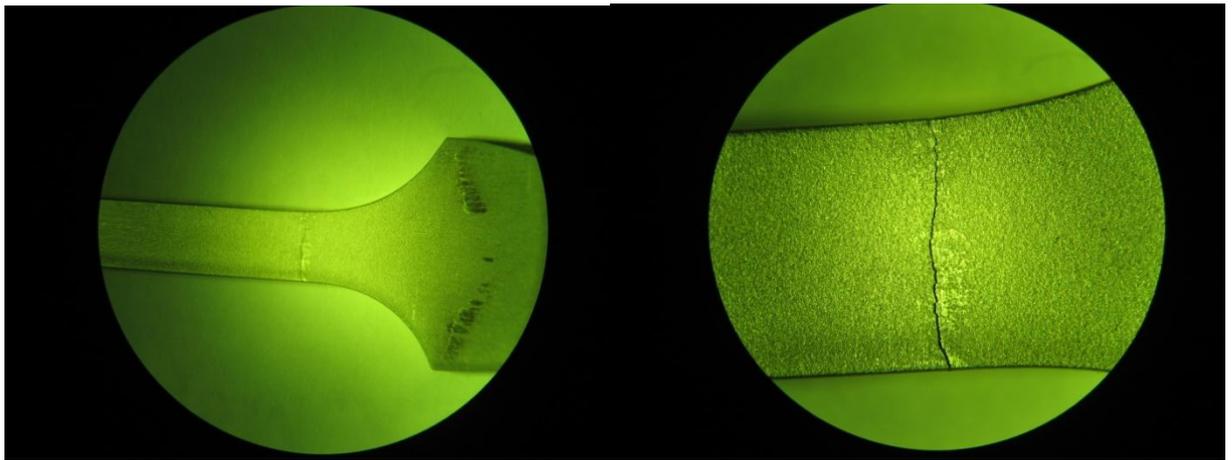
Таблица 5.2

Результаты испытаний в условиях многоциклового усталости образцов типа II

№ режима	Тип дроби	№ образца	Число циклов до разрушения для образца	Условный предел выносливости σ_{-1} , МПа
1	Стеклянные шарики, диаметр 212 – 300 мкм	44	6,80E+05	395
		45	1,00E+06	395
		46	1,36E+06	39,
2		10	8,80E+05	395
		39	2,80E+05	365
		43	2,50E+05	455
3		38	1,97E+06	395
		32	8,70E+05	425
		33	1,47E+06	395
4		Стальная дробь, диаметр 180 – 500 мкм	11	2,00E+06
	12		1,20E+05	545
	13		5,00E+05	575
5	16		5,40E+05	695
	17		4,20E+05	695
	31		2,00E+06	515
6	15		1,46E+06	605
	19		1,20E+05	515
	36		1,90E+06	605

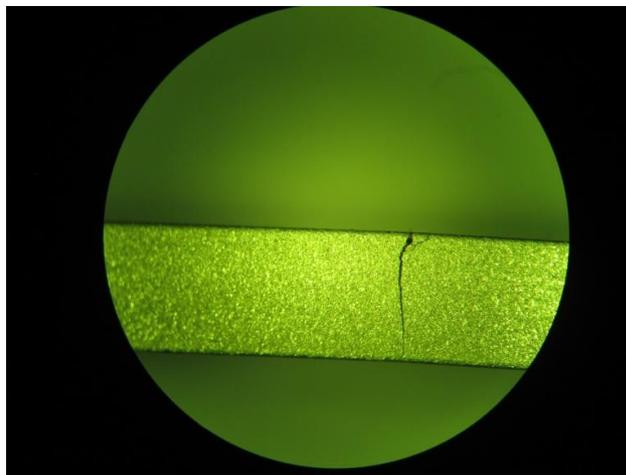
На образцах типа I замеры микротвердости проводились по длине на неупрочненной стороне (с шагом 3 мм), а также в зонах 1 (с шагом 2,2 мм), 2 (с шагом 0,35 мм), 3 (с шагом 0,3 мм).

Схема измерений микротвердости на образцах типа II представлена на рис. 5.5. На участках 1-5 шаг измерения составлял 0,7 мм; на участке 6 – 1,4 мм; на участке 7 – 2 мм (направление измерения на рис. 5.5 – слева направо).



а

б



в

Рис. 5.4. Трещина на образце № 32: а – общий вид образца, х5; б – вид сверху, х16; в – вид сбоку, х16

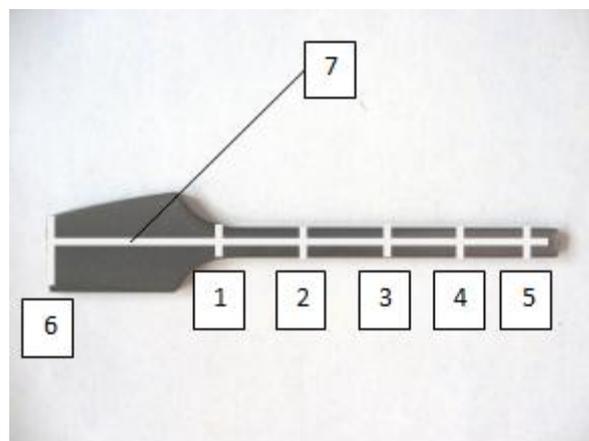


Рис. 5.5. Схема измерений микротвердости на образцах типа II: 1-6 – замеры поперек образца, 7 – замер вдоль образца.

Данные по измерению микротвердости в анализируемых образцах типа I, II и распределение НК представлены в таблице 5.3. Далее характерные особенности поведения микротвердости будут приведены и в графической форме.

Выявлено, что микротвердость в неупрочненной зоне образцов типа I (рис. 5.1, б) имеет ярковыраженный неоднородный характер. Разброс значений микротвердости составляет примерно 2700 единиц (от 400 НК до 3100 НК). Это обусловлено тем, что поверхность после шлифовки имеет полосчатое строение с характерными зонами впадин и выступов (рис. 5.6). Ширина этих зон составляет примерно 25-40 мкм. Отпечатки пирамидок при вдавливании имеют достаточно прерывистый характер, и их величина изменяется от 18 до 48 мкм в зависимости от того, в какую область поверхности попадает отпечаток (рис. 5.7).

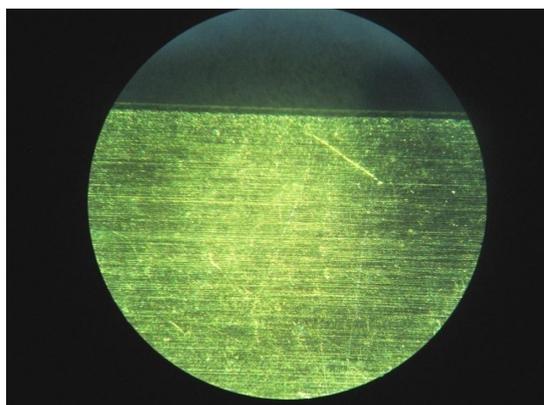


Рис. 5.6. Структура неупрочненной зоны образцов типа I. X 16



Рис. 5.7. Прерывистый характер отпечатков от пирамидок в неупрочненной зоне образцов типа I

В качестве иллюстрации на рис. 5.8 показаны графики изменения микротвердости в зоне шлифовки для образца № 17.

На образцах типа I при стравливании поверхностного упрочненного слоя глубиной до 150 – 170 мкм происходит уменьшение шероховатости. Выступы и впадины сглаживаются, значение микротвердости на всех образцах практически не изменяется и составляет 500 – 600 НК. Рис. 5.9 иллюстрирует типичный характер распределения микротвердости в зоне 1 образцов типа I (образец № 27).

Таблица 5.3

Данные по измерению микротвердости в образцах типа I, II

№ режима	№ образца	Микротвердость, НК на образцах типа I				Микротвердость, НК на образцах типа II на соот- ветствующих участках						
		Не- упр. ст.	Зона 1	Зона 2	Зона 3	1	2	3	4	5	6	7
1	17 (тип I)	490 - 2300	500- 550	980- 1200	800- 1200							
	44 (тип II)					950- 1050	1000- 1050	1200- 2200	1400- 2500	1400- 2200	550- 560	500- 2500
2	- 10 (тип II)					1000- 1050	1000- 1050	1000- 1050	1000- 1050	1400- 1500	550- 560	500- 2000
3	55 (тип I)	450- 1800	450- 600	800- 1500	500- 1000							
	38 (тип II)					1500- 1600	1600- 2000	1400- 1500	1400- 1500	1500- 2000	550- 560	500- 2200
4	- 11 (тип II)					900- 1000	500- 600	950- 1050	1100- 1150	1100- 1200	500- 700	980- 1500
5	43 (тип I)	450- 2100	480- 580	600- 1000	980- 1400							
	16 (тип II)					1000- 1100	600- 900	1000- 1500	1000- 1100	1050- 1100	500- 600	500- 1000
6	- 15 (тип II)					850- 900	950- 1050	600- 1000	500- 1000	1000- 1500	500- 700	550- 2000
7	27 (тип I)	2100- 3100	500- 600	500- 600	800- 900							
8	59 (тип I)	400- 3100	550- 900	600- 1500	500- 5000							

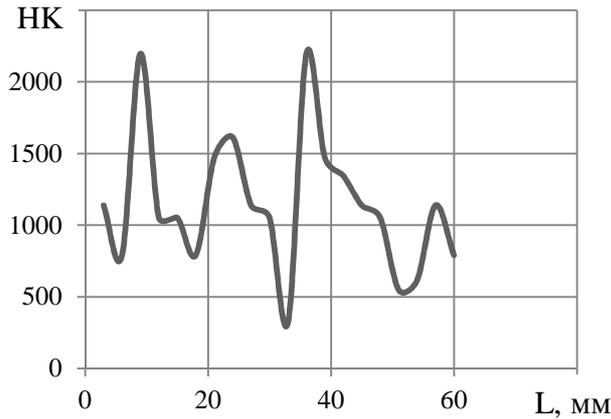


Рис. 5.8. Характерное изменение микротвердости на неупрочненной стороне образца типа I, №17

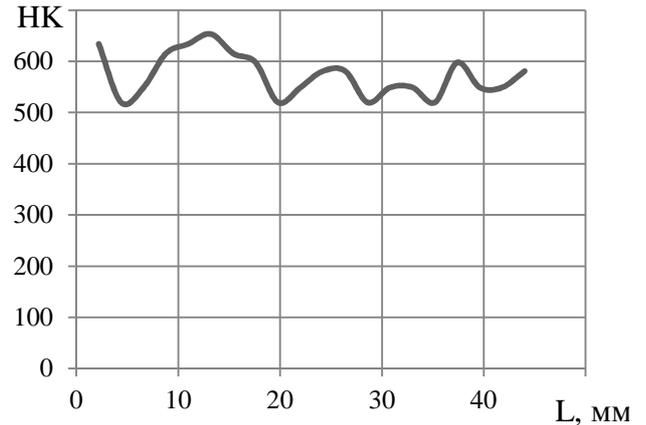
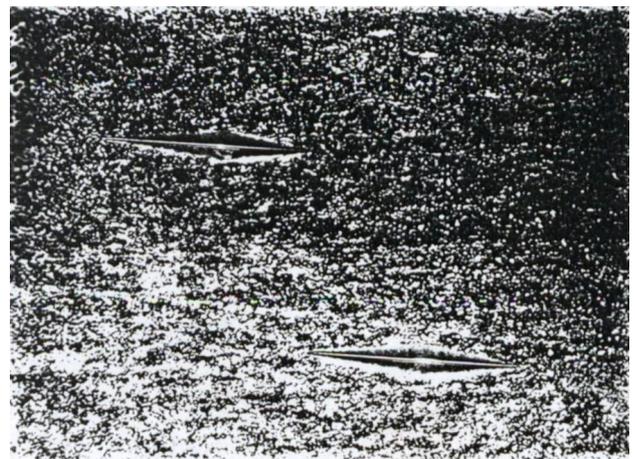


Рис. 5.9. Характерное изменение микротвердости в травленной зоне (зона №1) образца типа I, №27

Проведенный металлографический анализ зон 2 и 3 показывает, что отполированная зона 2 на образцах № 17, 48, 55, обработанных стеклянными шариками, имеет однородный белый цвет с четкими отпечатками индентора. Образцы после обработки стальной дробью имеют некоторые разводы, структура поверхности неоднородная с наличием темных и светлых областей. Особенно контрастно это проявляется в зоне 3. На рис. 5.10 показана характерная структура поверхности в зоне 2 и зоне 3 образца № 43 (после обработки стальной дробью).



а



б

Рис. 5.10. Отпечатки от пирамидки в зонах 2 (а) и 3 (б) на образце № 43

На этом этапе исследований можно сделать некоторые выводы. Во-первых, сравнение графиков на рис. 5.8 и 5.9 свидетельствует о том, что для более объективной информации о микротвердости поверхности образцов после механической обработки деталей (в нашем случае – шлифования) желательно выполнить дополнительную технологическую процедуру (например, полирование). Во-вторых, анализ данных таблицы 5.3 говорит о том, что микротвердость в неупрочненной (стравленной) зоне 1, которая соответствует исходному состоянию материала, намного меньше, чем в упрочненных зона 2 и 3. Одно из объяснений этого факта можно связать с наличием сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, которые препятствуют проникновению пирамидок в тело детали, т.е. для того чтобы пирамидка проникла на такую же глубину, как и в неупрочненном образце, необходимо прикладывать бóльшие нагрузки. Это создает «видимость» повышения микротвердости поверхности упрочненного образца, и, по сути, является результатом технологической обработки поверхности, а не изменением свойств самого материала.

При сопоставлении данных по измерению микротвердости при обработке в режимах 1-3 и 4-7 (табл. 5.3) выявлено, что наибольший прирост микротвердости на образцах типа 1 наблюдается при упрочнении стеклянными шариками, где среднее значение НК составляет 1200-1500 единиц. При обработке стальной дробью микротвердость возрастает до 800-900 НК.

Анализ измерений микротвердости в образцах типа II также указывает на более эффективный (в смысле получения большего значения микротвердости) режим при обработке стеклянными шариками, что следует из анализа данных таблицы 5.3 и визуального сравнения графиков на рис 5.11, 5.12.

На этой стадии исследования можно сделать два вывода. Из выполненного анализа и данных таблицы 5.3 следует, что микротвердость поверхности после обработки стеклянными шариками выше, чем после обработки стальными шариками. Но, с другой стороны, из данных таблицы 5.2 имеем, что предел выносливости (образцов типа II), наоборот, выше после обработки поверхности

стальными шариками. По нашему мнению, микротвердость упрочненной поверхности, в отличие от остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, не может служить объективным критерием оценки влияния упрочнения на предел выносливости деталей. Аналогичное утверждение было высказано и авторами работы [83].

Отдельного анализа заслуживают графики на рис. 5.11, и рис. 5.12, которые фактически иллюстрируют влияние остаточных испытаний на кинетику микротвердости. Экспериментальные усталостные испытания выполнены при изгибе, т.е. консольно закрепленный конец образца типа II (лопатка на рис. 5.2) крепится к вибростенду, и далее в режиме резонансных частот проводятся усталостные испытания. Максимальные напряжения при этом возникают в зоне 1 (см. рис. 5.5) и далее они убывают в последующих зонах 2-5, а на другом конце образца (после зоны 5) напряжений практически не наблюдается. На рис. 5.11 и рис. 5.12 величина L отложена от зоны 1 вдоль зон 2-5, т.е. при $L = 0$ наблюдаются максимально возможные амплитудные значения напряжений, которые убывают до нуля при увеличении величины L . В зоне 6 (место крепления образца) изгибных напряжений также не наблюдается, т.е. в этом месте мы имеем исходную величину микротвердости, которая для образца № 38 составляет порядка 550-560 единиц (см. таблицу 5.3). До усталостных испытаний величина микротвердости в зонах 1-5 упрочненного образца № 38 составляет в среднем одинаковое значение 1400-1600 единиц. Однако после усталостных испытаний ее распределение уже не равномерное и имеет вид, представленный на рис. 5.11. Из анализа этого графика следует, что в наиболее нагруженной зоне 1 (где и происходит усталостное разрушение) произошла полная «релаксация» микротвердости до исходного (неупрочненного) состояния, в то время как в периферийных зонах 4 и 5, в которых напряжения практически отсутствуют, значения микротвердости почти не изменились. Поскольку ранее увеличение микротвердости на упрочненных образцах связывалось с наличием сжимающих остаточных напряжений, то можно сделать вывод о полной релаксации оста-

точных напряжений в зоне 1 в процессе усталостных испытаний. Объяснить этот факт можно тем, что при усталостных испытаниях с течением времени (числа циклов нагружения) происходит накопление необратимых деформаций, которые и вызывают перераспределение остаточных напряжений и их релаксацию, аналогично случаю высокотемпературной ползучести, рассмотренному в главе 4.

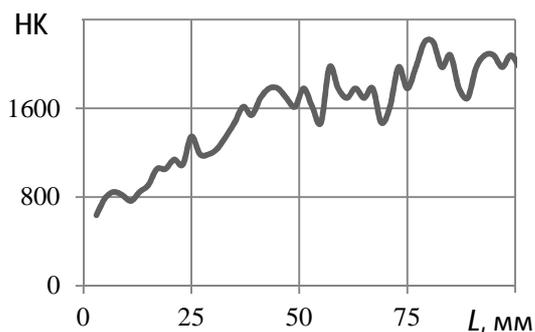


Рис. 5.11. Изменение микротвердости по всей длине образцов типа II при обработке стеклянными шариками, №38

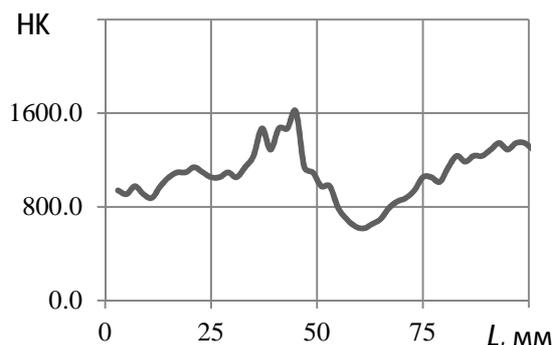
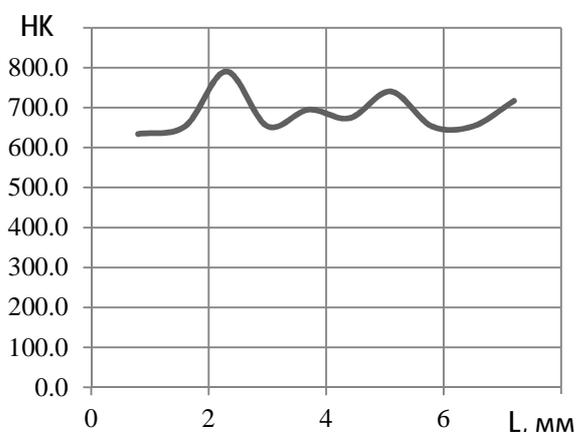
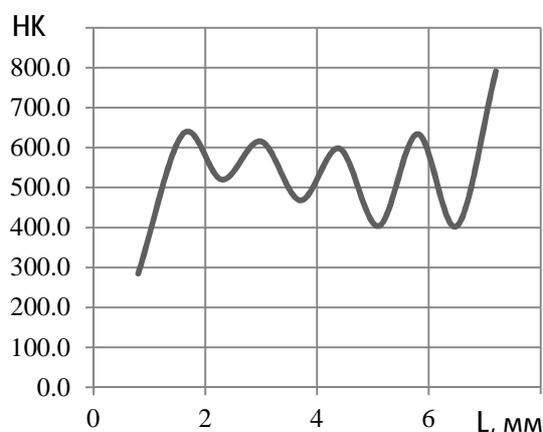


Рис. 5.12. Изменение микротвердости по всей длине образцов типа II при обработке стальной дробью, № 11

Проведенный анализ значений микротвердости поперек образца (участки 1-6) показал стабильное значение микротвердости (500-600 НК) на замере №6 при различных видах дробеструйной обработки (рис. 5.13). Наибольшее значение микротвердости наблюдается на участках 4, 5.



а



б

Рис. 5.13. Изменение микротвердости образцов типа II на участке №6: при

обработке стеклянными шариками - №10 (а) и стальной дробью – №16 (б)

При сопоставлении значений микротвердости на образцах типа I (без усталостных испытаний) и типа II (на которых проводились испытания на усталость) выявлено, что максимальные значения микротвердости в зонах 2, 3 образцов типа I значительно ниже микротвердости периферийной части образцов типа II (таблица 5.3).

Очередной этап исследований заключался в измерении шероховатости образцов. Для этого использовался прибор «Surftest SJ-201 P» (рис. 2.8). На образцах типа I были исследованы 3 участка:

- 1) неупрочненная сторона (рис. 5.1, б). Измерение шероховатости проводилось вдоль образца. Базовая длина замера составляла 12,5 мм;
- 2) упрочненная сторона, зона 1. В данной области по длине образца проводилось 2 измерения, базовая длина которых составляла также 12,5 мм;
- 3) упрочненная сторона, зона 3. Измерение шероховатости осуществлялось поперек участка. Базовая длина замера составляла 4 мм.

Схема измерений шероховатости на образцах типа II представлена на рис. 5.14. На каждой лопатке произведено по 6 замеров с каждой стороны. Базовая длина всех замеров составляла 12,5 мм.

Исследование шероховатости в указанных зонах производилось по следующим параметрам:

R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам (в расчет формулы входят $H_{i \max}$ – отклонение пяти наибольших максимумов профиля, $H_{i \min}$ – отклонение пяти наибольших минимумов профиля);

R_q – среднее квадратичное отклонение профиля.

Результаты измерения шероховатости представлены в таблицах 5.4 – 5.7. Анализ подвергались профилограммы с указанием нормального профиля и параметрами шероховатости поверхности, внешний вид одной из которых представлен на рис. 5.15.

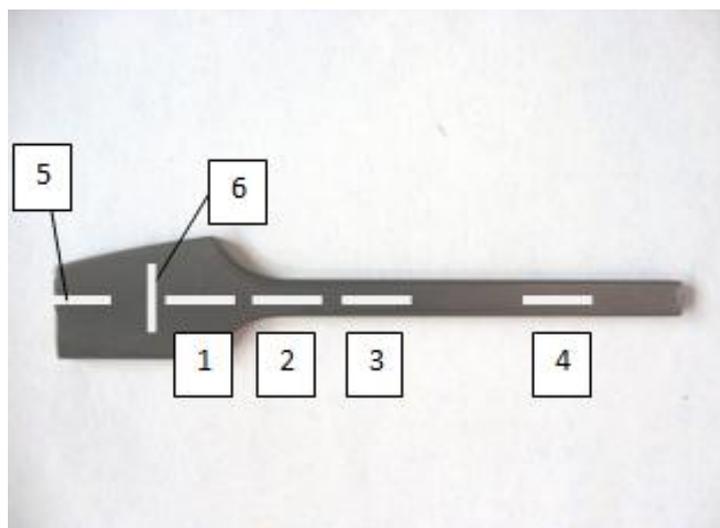


Рис. 5.14. Схема измерений шероховатости на образцах типа II: 1-5 – замеры вдоль образца; 6 – замер поперек образца.

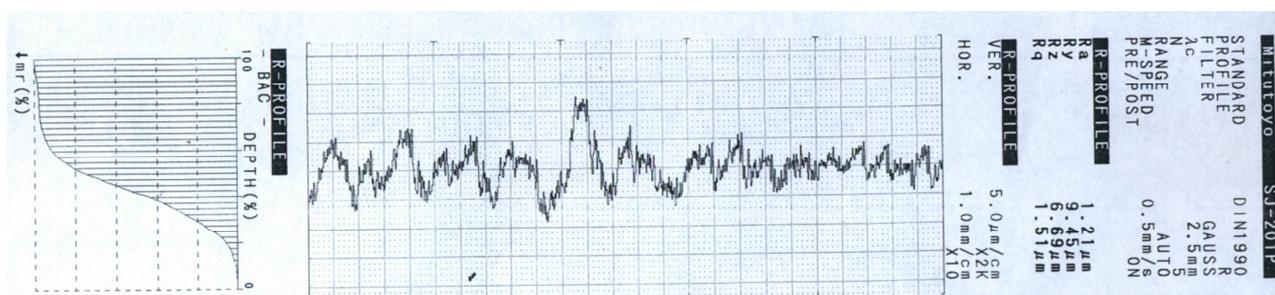


Рис. 5.15. Внешний вид профилограммы, используемой для расшифровки значений шероховатости

Первоначально анализу подвергались образцы типа I с неупрочненной стороны. Результаты замеров R_z и R_q показаны в таблице 5.4. Графики нормального профиля поверхности для этого участка представлены на рис. 5.16.

Таблица 5.5 иллюстрирует влияние режима травления на изменение шероховатости. Как было указано выше, в зоне травления для каждого образца проводилось по 2 измерения.

Таблица 5.4

Результаты измерения шероховатости образцов типа I с неупр. стороны

№ режима	№ образца	R_z , мкм	R_q , мкм
1	17	2,06	0,47
2	48	1,56	0,30
3	55	2,47	0,55
4	50	1,50	0,23
5	43	2,28	0,38
6	53	2,56	0,59
7	27	2,32	0,50
8	59	1,86	0,40

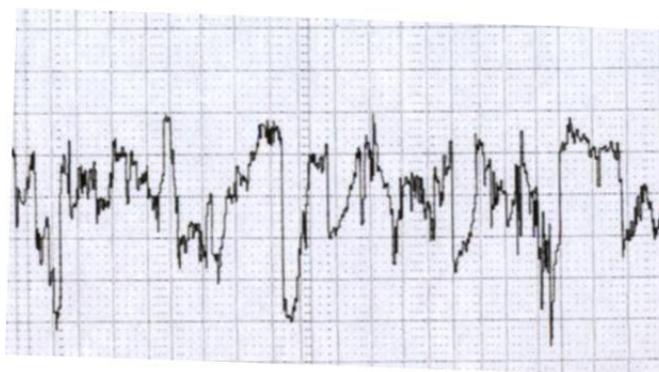


Рис. 5.16. Нормальный профиль поверхности неупрочненной стороны образцов типа I, №27

Таблица 5.5

Результаты измерения шероховатости образцов типа I в зоне травления

№ режима	№ образца	R_z , мкм	R_q , мкм
1	17	5,26 / 6,07	1,06 / 1,14
2	48	5,48 / 5,81	1,03 / 1,09
3	55	4,73 / 4,54	1,03 / 1,04
4	50	5,08 / 4,87	0,96 / 0,95
5	43	4,28 / 5,25	0,95 / 1,05
6	53	5,70 / 5,16	1,11 / 0,95
7	27	6,34 / 6,51	1,11 / 1,31
8	59	4,58 / 5,96	0,83 / 0,94

Данные, приведенные в таблицах 5.4 и 5.5, свидетельствуют о росте шероховатости после травления.

Результаты по измерению шероховатости после упрочнения (зона 3, рис. 5.1, а) показаны в таблице 5.6.

Таблица 5.6

Результаты измерения шероховатости образцов типа I в зоне упрочнения

№ режима	№ образца	R_z , мкм	R_q , мкм
1	17	3,80	0,78
2	48	5,42	1,15
3	55	5,84	1,17
4	50	4,28	0,89
5	43	4,22	0,99
6	53	6,92	1,47
7	27	7,27	1,60
8	59	6,01	1,14

Из анализа данных таблиц можно сделать вывод, что режимы травления и дробеструйной обработки оказывают примерно одинаковое влияние на рост шероховатости. Типичный график изменения нормального профиля поверхности после различных видов обработки на примере образца №43 представлен на рис. 5.17.

Вместе с тем, при сопоставлении результатов изменения шероховатости при обработке в режимах 1-3 и 4-6 выявлено, что стеклянные шарики изменяют шероховатость в меньшей степени, чем стальная дробь.

В заключении рассматривалось влияние усталостных испытаний на изменение шероховатости. Результаты замеров по участкам, указанных на рис. 5.18 представлены в таблице 5.7.

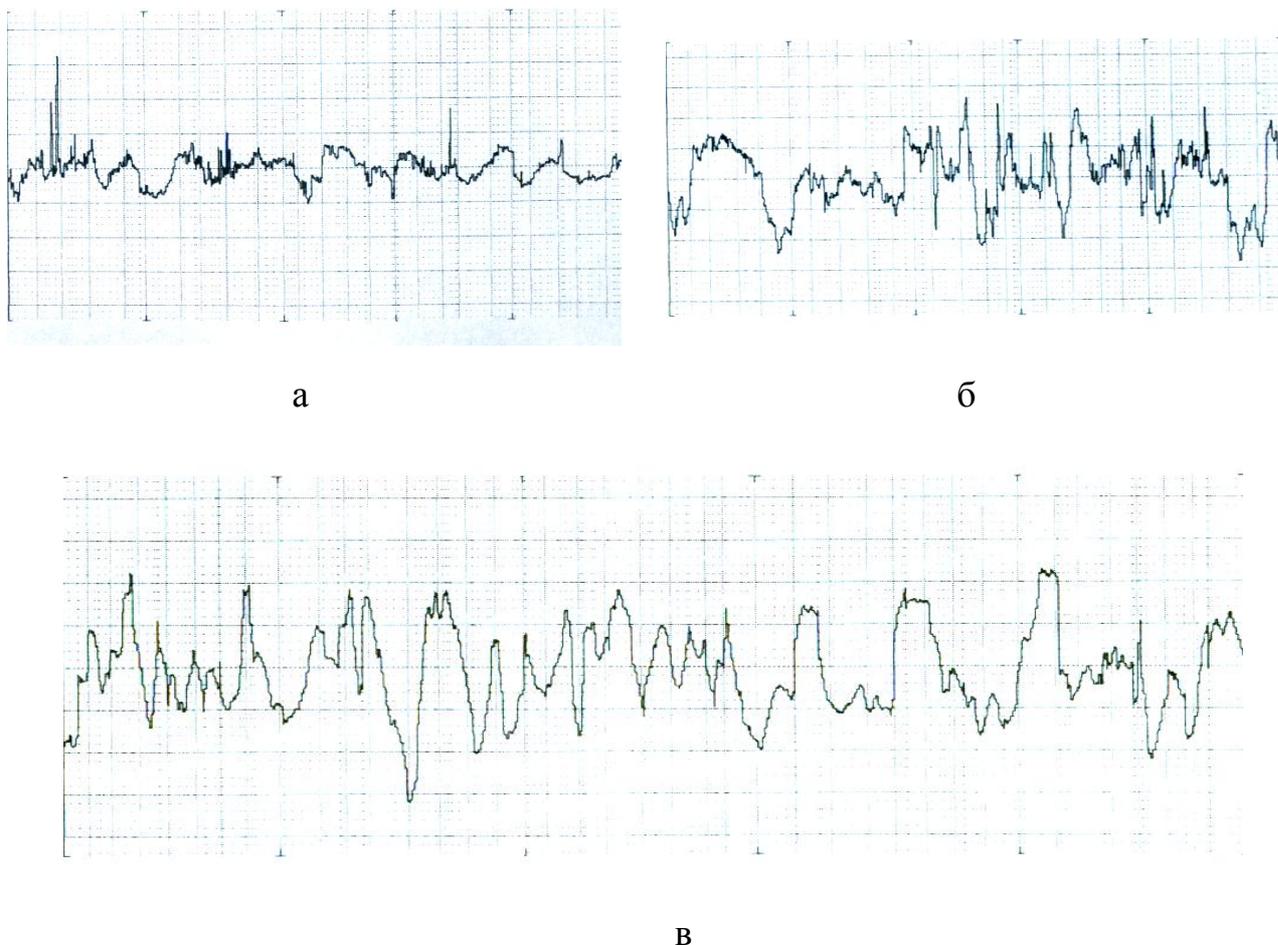
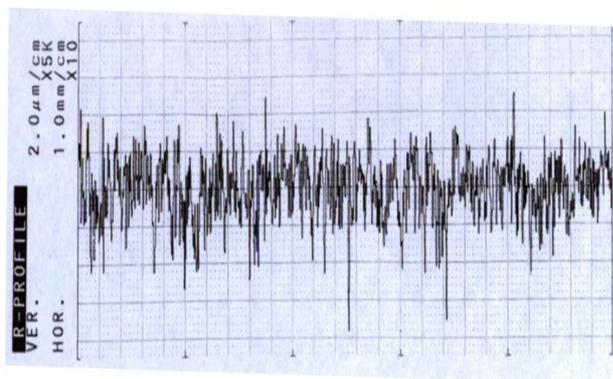


Рис. 5.17. График изменения нормального профиля поверхности образца №43:
 а – неупрочненная зона, б – травленая зона, в – упрочненная зона

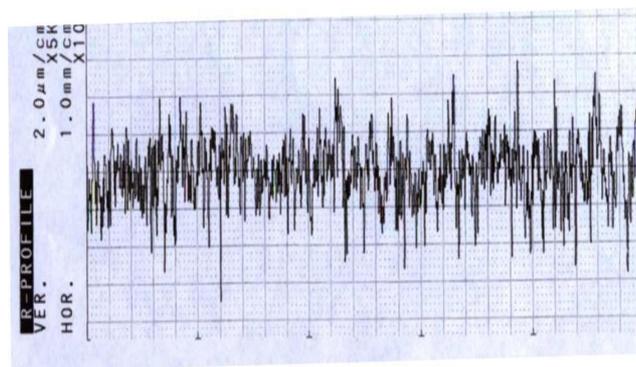
Графики, приведенные на рис. 5.18, показывают изменение профиля поверхности рассматриваемых образцов в различных зонах (схему см. на рис. 5.14). Представлено по одному образцу из каждого режима. Следует обратить внимание на то, что графики построены в разном масштабе, значения которого указаны с левой стороны профилограммы.

Исследования шероховатости, проведенные с обратных сторон образцов, дают примерно такие же значения.

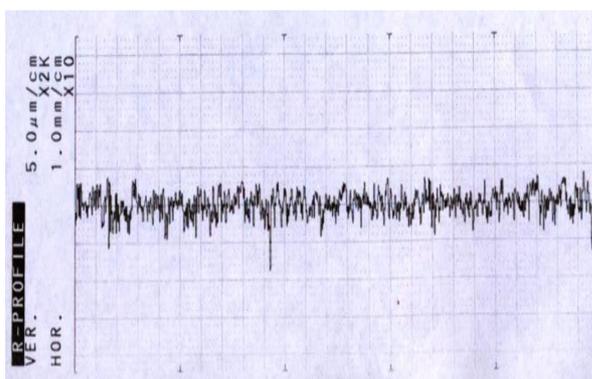
Анализ результатов, представленных в таблицах 5.6 и 5.7, указывает на незначительный рост шероховатости после испытаний на усталость. Данные этих таблиц подтверждают полученные ранее выводы о том, что обработка поверхности стальной дробью значительно влияет на рост шероховатости.



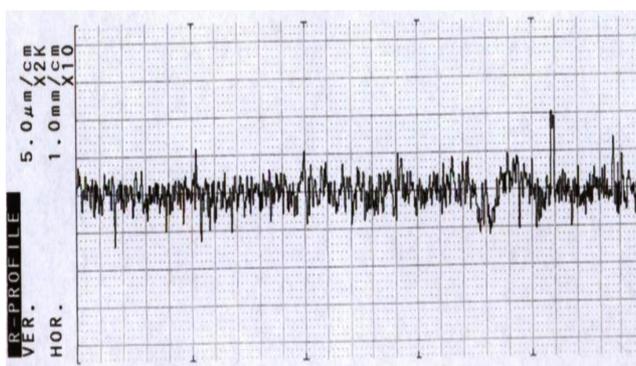
а



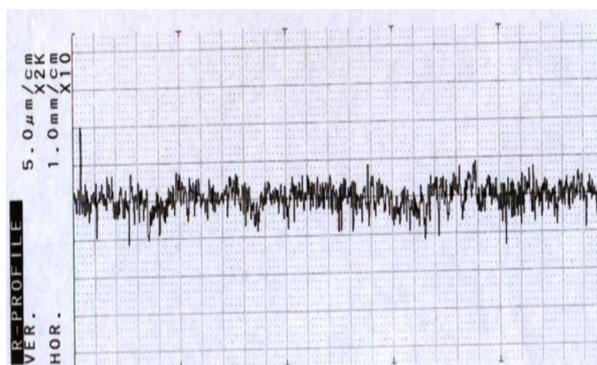
б



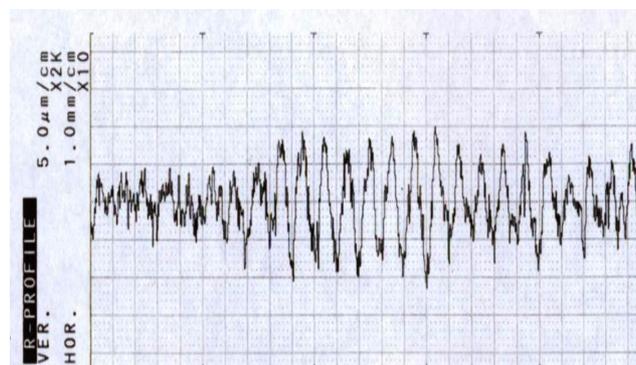
в



г



д



е

Рис. 5.18. Изменение нормального профиля поверхности для образца № 44:
замеры 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5(д), 6 (е)

Таблица 5.7

Результаты измерения шероховатости на образцах типа II

№ режима	№ образца	Замер 1		Замер 2		Замер 3		Замер 4		Замер 5		Замер 6	
		R _z ,	R _q ,										
		мкм											
1	44	5,07	0,74	5,12	0,79	4,71	0,73	5,84	0,88	5,32	0,75	8,71	1,93
2	10	6,56	0,98	5,93	0,94	5,16	0,97	5,41	0,94	6,96	1,03	6,00	1,00
	39	6,42	1,05	5,70	0,98	5,26	1,04	7,54	1,30	6,98	1,12	6,03	1,04
3	38	6,36	1,06	6,10	1,03	6,73	1,08	7,19	1,28	6,35	1,14	6,10	1,09
	32	7,53	1,33	6,36	1,06	6,04	1,05	6,23	1,06	6,82	1,17	7,01	1,17
4	11	5,48	0,96	7,83	1,52	7,99	1,63	8,27	1,59	6,38	1,32	6,82	1,42
	12	6,74	1,44					7,21	1,45	7,11	1,34	7,84	1,50
5	16	10,54	2,18	8,83	1,79	9,27	1,78	8,36	1,73	8,88	1,99	9,32	1,89
	17	9,20	1,95					9,82	2,00	7,95	1,57	10,73	2,17
6	15	12,45	2,43					11,84	2,49	12,04	2,50	15,70	3,02

В заключении данного пункта приведем результаты металлографического анализа в дополнение к выполненным исследованиям по определению микротвердости и шероховатости. Для определения размера зерна из партии обработанных образцов были выбраны произвольно по 2 образца после упрочнения стеклянными шариками и стальной дробью. В дальнейшем на шлифовальном станке (рис. 5.19) был сошлифован слой толщиной примерно 4 мм в поперечном сечении образцов. После проведения шлифовки и полировки производилось травление образцов с помощью реактива Марбле. Определение размера зерна производилось по требованиям ГОСТ 5639-82 [29] на оптическом металлографическом микроскопе MEF-2 фирмы «Reichert» (Austria) (рис. 5.20).



Рис. 5.19. Шлифовальный станок



Рис. 5.20. Металлографический
микроскоп МЕФ-2

При измерении величины зерна по глубине образца обнаружены следующие результаты. В поперечном сечении образцов типа I, поверхность которых обработана стальной дробью, имеется поверхностный слой глубиной 30-35 мкм со средним условным диаметром зерна 9,9 мкм (рис. 5.21, поверхность образца расположена слева). В центральной зоне наблюдается однородная микроструктура с величиной зерна 0,0138 мм. Структура образцов, обработанных стеклянными шариками, однородна по всему сечению. Средний условный диаметр зерна составляет 13,8 мкм. При этом на образцах типа II, упрочненных стеклянными шариками, в поверхностном слое наблюдается большое количество трещин. Типичный дефект представлен на рис. 5.4.

Таким образом, существенного изменения зерна в процессе поверхностного пластического деформирования не наблюдается.

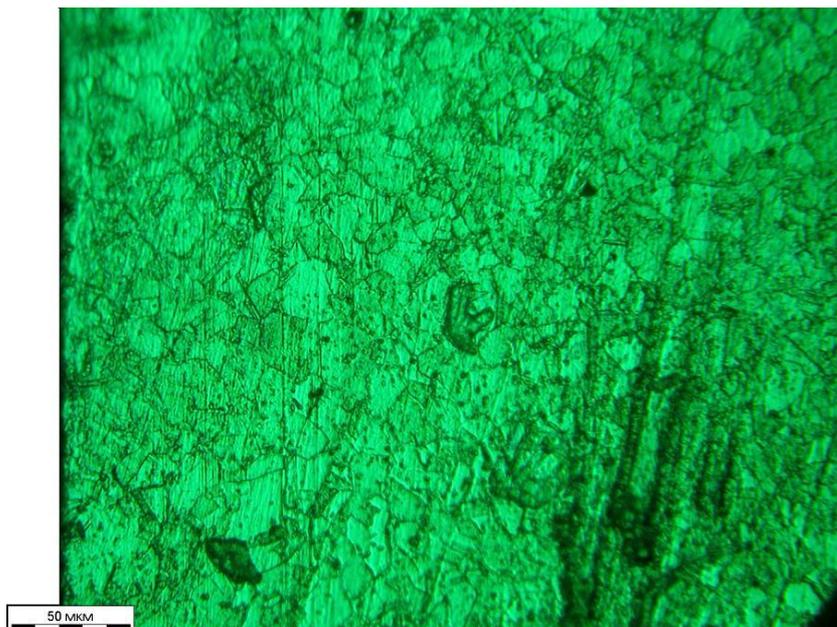


Рис. 5.21. Изменение величины зерна в поперечном слое после обработки стальной дробью (x250)

Выводы по пункту 5.2

1. Образцы в исходном состоянии имеют полосчатую структуру с выступами и впадинами, ширина которых составляет 25-40 мкм, и отличаются неоднородным распределением микротвердости. Разброс значений в этой зоне составляет 2700 НК.

2. Травление, проведенное на образцах типа I, приводит к уменьшению неоднородности микротвердости и увеличивает шероховатость.

3. Сопоставление режимов дробеструйной обработки на образцах типа I указывает, что обработка стеклянными шариками – более выгодный режим с точки зрения повышения микротвердости и незначительного увеличения шероховатости по сравнению с обработкой стальной дробью.

4. Увеличение значений микротвердости после процедуры поверхностного упрочнения в основном связано с наличием сжимающих остаточных напряжений, а не с изменением микроструктуры материала.

5. Показано, что испытания на многоцикловую усталость приводят к «релаксации» микротвердости в областях с максимальными значениями напряже-

ний, что, по-видимому, связано с релаксацией наведенных остаточных напряжений.

6. Циклические напряжения при усталостных испытаниях не оказывают существенного влияния на шероховатость поверхности.

5.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК И МНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ, ШЕРОХОВАТОСТЬ И МИКРОСТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВОВ В95 И Д16Т

В настоящем пункте проводятся исследования, аналогичные выполненным в пункте 5.2, для полых цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т, дополненные исследованиями упрочненных образцов, подвергнутых термоэкспозиции (ТЭ) при температуре $T = 125$ °С в течение 100 часов, т.е. температурным выдержкам без механической нагрузки. Для исследования использовались образцы диаметром 15 мм с отверстием 5 мм. В качестве метода упрочнения использовалась пневмодробеструйная обработка (ПДО) поверхности стальной дробью диаметром 1,5-2 мм при давлении воздуха $p = 0,25$ МПа и длительности обработки 10 мин. Испытания образцов на усталость при чистом изгибе проводились в соответствии с ГОСТ 25.502-79, при этом реализовывался симметричный цикл нагружения. База испытаний составляла $1 \cdot 10^7$ циклов. Определение предела выносливости проводилось по методу ступенчатого изменения нагрузки (метод «вверх-вниз»). Испытания образцов при чистом изгибе с вращением образца проводились на машинах МУИ-6000. Более подробные детали экспериментальных исследований изложены в монографии [83].

Образцы из сплава Д16Т подробно описаны в главе 2.3. Образцы из сплава В95 имели те же характеристики по форме и размеру (рис. 2.25). Таблица 5.8

содержит информацию по режимам обработки и усталостным испытаниям образцов.

Таблица 5.8

Данные испытаний для цилиндрических образцов из сплавов В95, Д16Т

№ образца	Марка алюминиевого сплава	Режим обработки	Циклические напряжения в процессе усталостных испытаний (предел выносливости σ_{-1}), МПа
Разрушенные образцы			
20	В95	ПДО	175 (сломался сам)
23	В95	ПДО	132,5 (доломали)
34	В95	ПДО+ТЭ	130 (сломался сам)
21	В95	ПДО	125 (сломался сам)
25	В95	ПДО	132,5 (доломали)
36	В95	ПДО+ТЭ	122,5 (сломался сам)
39	В95	ПДО+ТЭ	115 (сломался сам)
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	152,5 (доломали)
21	Д16Т	ПДО	160 (сломался сам)
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	150 (доломали)
15	Д16Т	ПДО	180 (сломался сам)
23	Д16Т	ПДО	157,5 (сломался сам)
30	Д16Т	ПДО+ТЭ	175 (доломали)
37	Д16Т	ПДО+ТЭ	152,5 (доломали)
Неразрушенные образцы			
8	В95	Неупр.	107,5
17	В95	ПДО	205
11	Д16Т	Неупр.	82,5
27	Д16Т	ПДО	160

Внешний вид разрушенного образца представлен на рис. 5.22. На образцах были выделены две зоны – периферийная (зона 1), которая не подвергалась упрочнению, и рабочая (зона 2), которая подвергалась упрочнению на некоторых образцах.



Рис. 5.22. Внешний вид разрушенного образца

Первый этап работы заключался в проведении макроструктурного анализа поверхности образцов и области разрушения.

Внешний вид зоны 1 представлен на рис. 5.23. На фотографии видно наличие впадин и выступов при проходе резца. Поверхность зоны 2 после упрочнения представляет собой достаточно неровный рельеф (рис. 5.24).

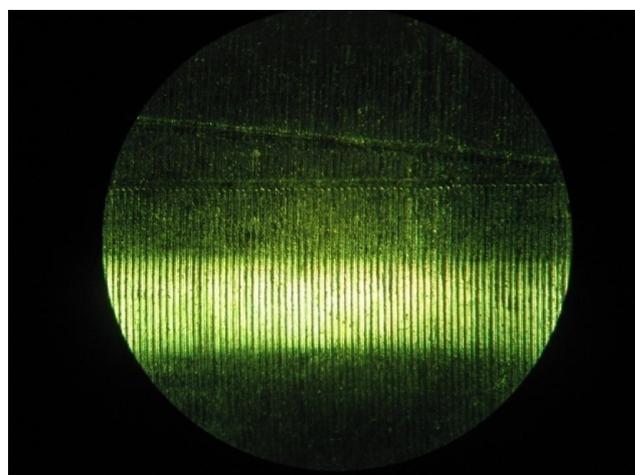


Рис. 5.23. Следы от резца в зоне 1

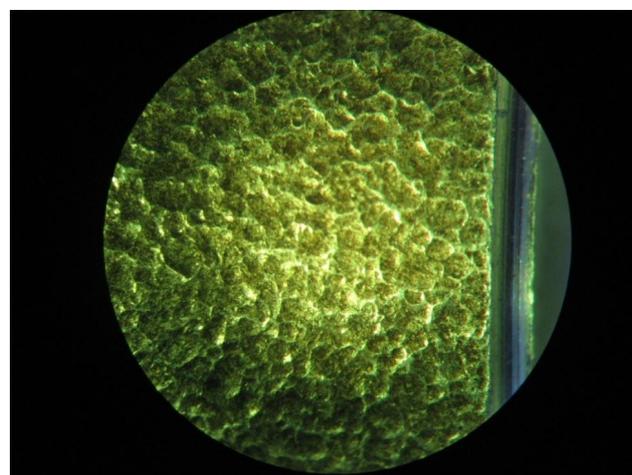


Рис. 5.24. Неровность поверхности после упрочнения

Рис. 5.25 иллюстрирует характерный вид изломов на образцах из сплавов В95 (№ 34, 23) и Д16Т (№ 36). Очагом разрушения является выступ (или впадина), которая имеет вязкую структуру (цифра 1 на рис. 5.25). В дальнейшем наблюдается ручьистый излом в виде ступенек (цифра 2 на рис. 5.25).

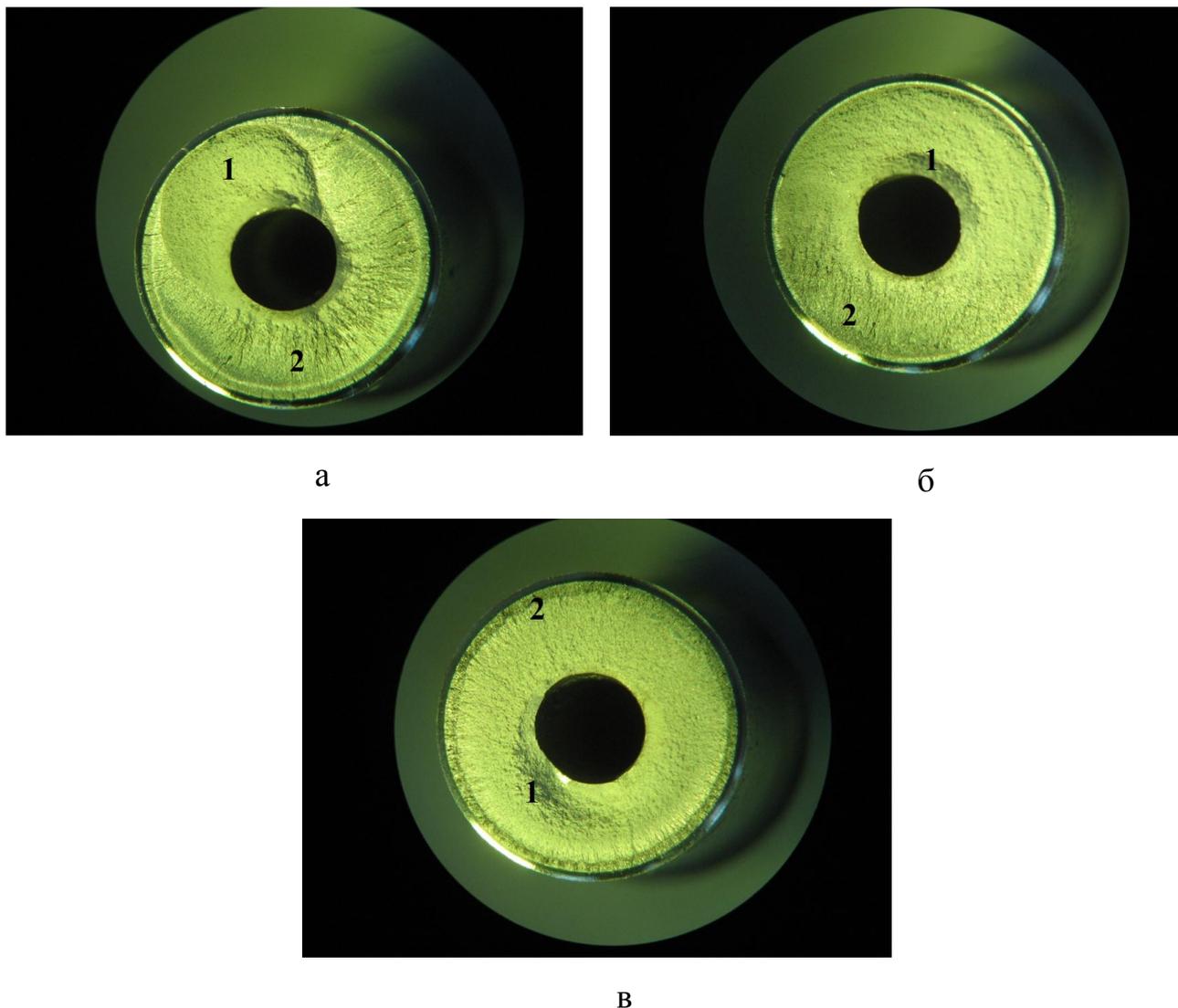


Рис. 5.25. Поверхность разрушения на образцах: № 34 (а), 23 (б), 36 (в). х8.

1 – очаг разрушения; 2 – ручьистый излом

Особый интерес представляют трещины, образованные в упрочненном слое, идущие вглубь от поверхности образца (рис. 5.26). С наличием этих трещин (точнее с их длинами), которые называются нераспространяющимися трещинами, связаны критериальные зависимости для оценки приращения предела выносливости упрочненных образцов по сравнению с неупрочненными образцами [83].

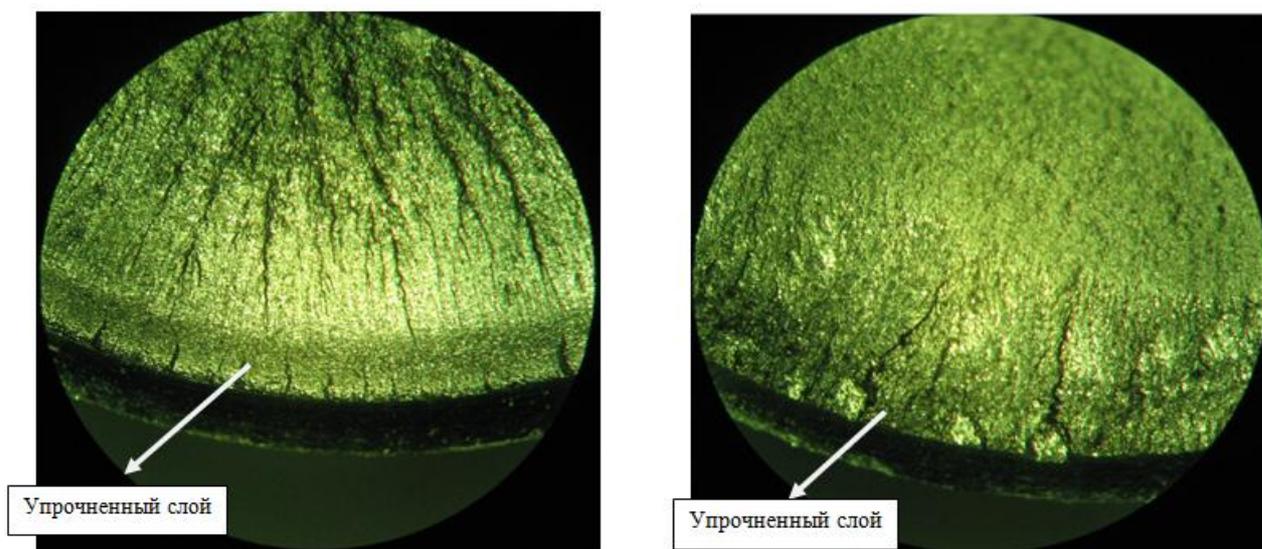


Рис. 5.26. Трещины в упрочненном слое. х56

Следующий этап работы состоял в измерении микротвердости поверхностного слоя образцов. На разрушенных и неразрушенных образцах измерение микротвердости проводилось в зоне 1 и зоне 2. Следует отметить, что допускается незначительная погрешность в полученных результатах, так как замеры микротвердости по Кнуппу в зоне 1 были затруднены ввиду малой ширины полос выступов и впадин (рис. 5.23). В зоне 2 влияние на точность измерений оказывала неровность рельефа. В зоне 1 шаг измерения составлял 2000-3000 мкм, а измерения микротвердости в зоне 2 осуществлялись в направлении от области разрыва образца с шагом 100-300 мкм (первые 3 замера) и 700-800 мкм (последующие замеры) на длину 17-18 мм.

Данные по измерению микротвердости в анализируемых образцах и характерное распределение НК для сплава В95 как после ПДО, так и после ПДО + ТЭ представлены в таблице 5.9 и на рис. 5.27 – 5.29, а для Д16Т – в таблице 5.9 и на рис. 5.30 – 5.32. Очередность рисунков соответствует порядку образцов в таблице 5.8. На некоторых образцах измерение микротвердости в зоне 2 проводилось дважды (для обеих половин), что представлено на графиках под буквами «б», «в»; в таблице 5.9 для них приведено 2 замера.

Выявлено, что распределение микротвердости по длине зоны 1 (рис. 5.22), т.е. в неупрочненной зоне, имеет практически однородный характер. Значения НК для сплава В95 составляют 200-280 НК, а для Д16Т – 150-250 НК. Неупрочненные образцы № 8 (сплав В95) и № 11 (сплав Д16Т) в зоне 2 (рабочая часть образца) имеют примерно такие же значения микротвердости.

Рассмотрим влияние пневмодробеструйной обработки на характер изменения микротвердости. В связи с упомянутой ранее неровностью рельефа на всех исследуемых образцах наблюдается сильный разброс значений микротвердости. Особо следует обратить внимание на влияние ПДО на образцы из сплава В95: микротвердость на образце № 20 местами увеличивается до 3600 НК, № 23 – до 1050 НК, №21 – до 2460 НК, № 25 – до 2200 НК. На образцах из сплава Д16Т также наблюдается рост микротвердости, но в меньшей степени (таблица 5.9).

Рост микротвердости (как и для плоских образцов из пункта 5.2) также можно связать с наличием сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, а не с изменением свойств материала в поверхностном слое. К обоснованию этой гипотезы вернемся чуть ниже при анализе влияния термоэкспозиции на остаточные напряжения и величину микротвердости.

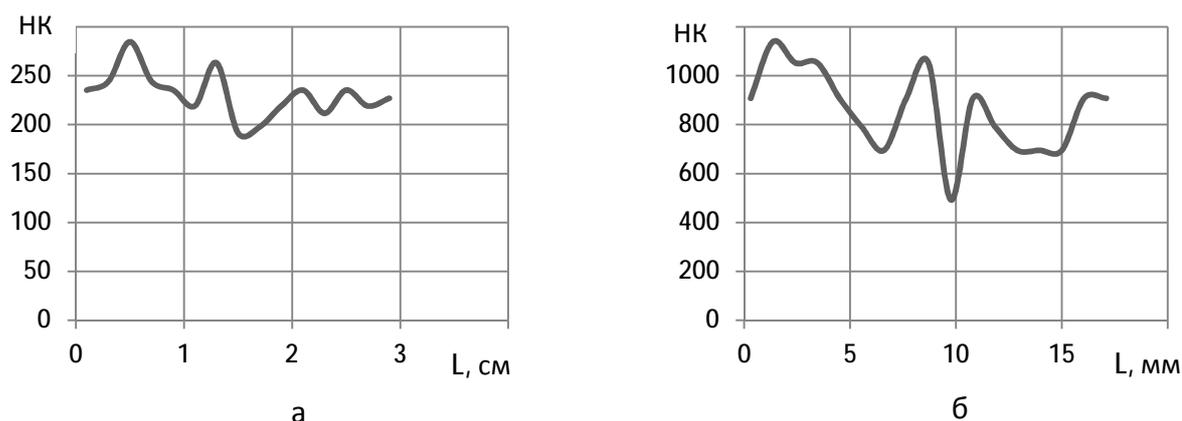
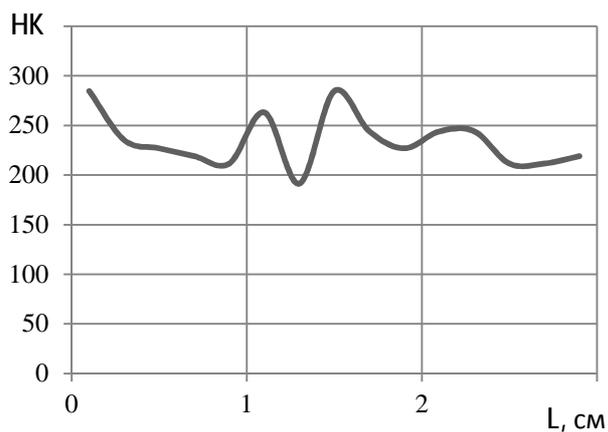
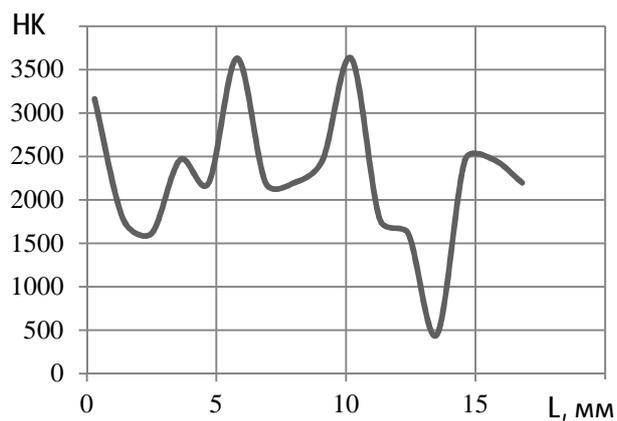


Рис. 5.27. Характерное изменение микротвердости на образце №23 (В95) в неупрочненной зоне 1 (а) и упрочненной зоне 2 (б)

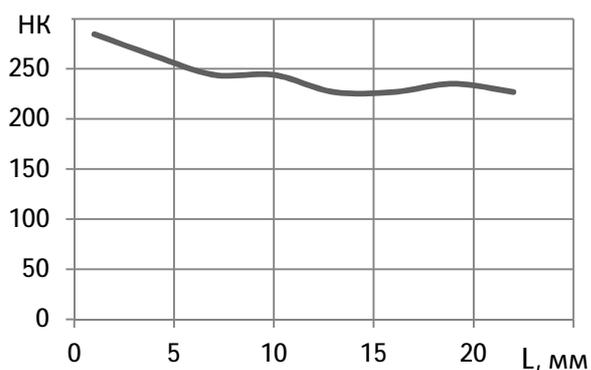


а

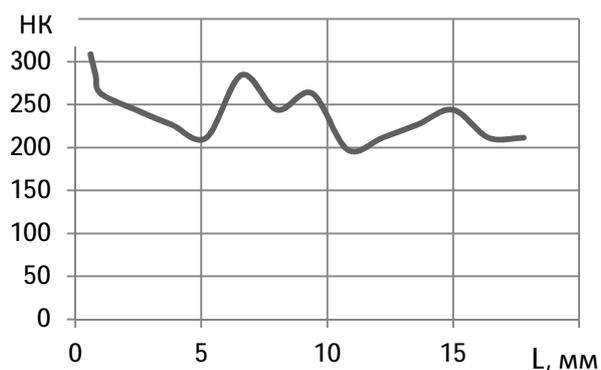


б

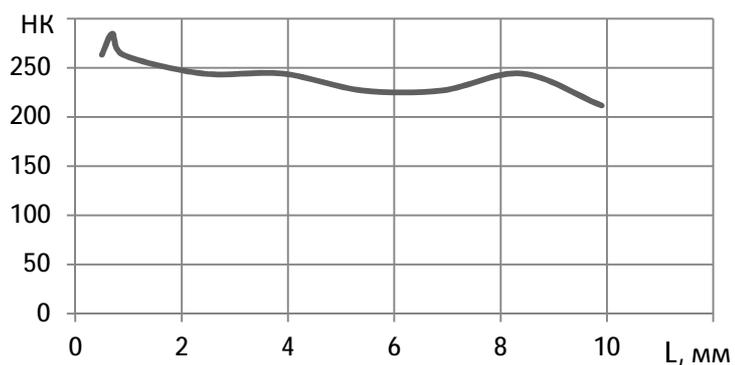
Рис. 5.28. Характерное изменение микротвердости на образце №20 (B95) в неупрочненной зоне 1 (а) и упрочненной зоне 2 (б)



а

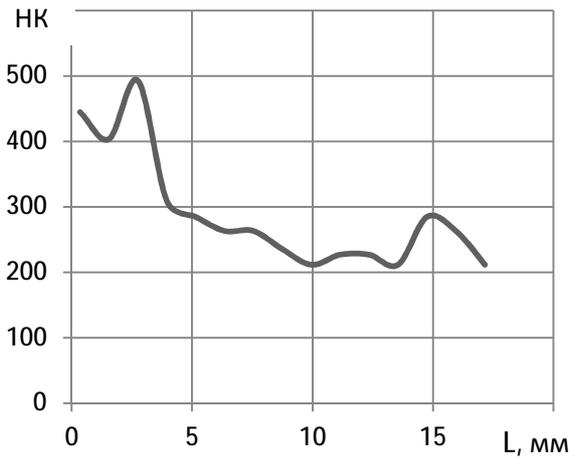
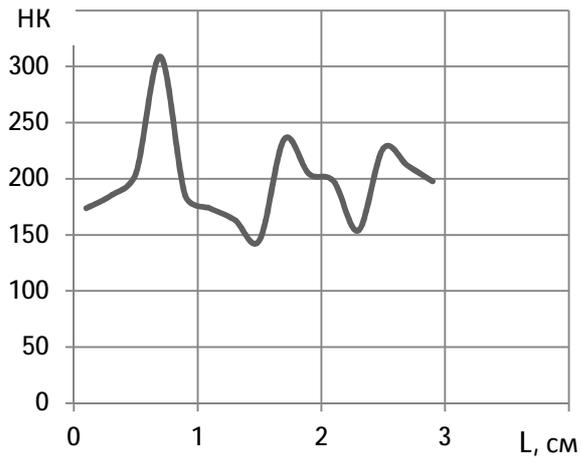


б



в

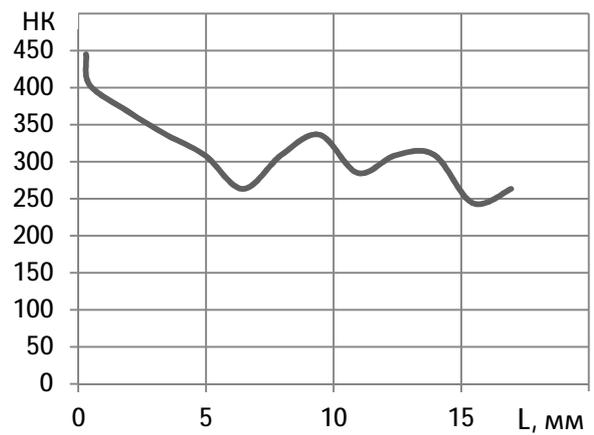
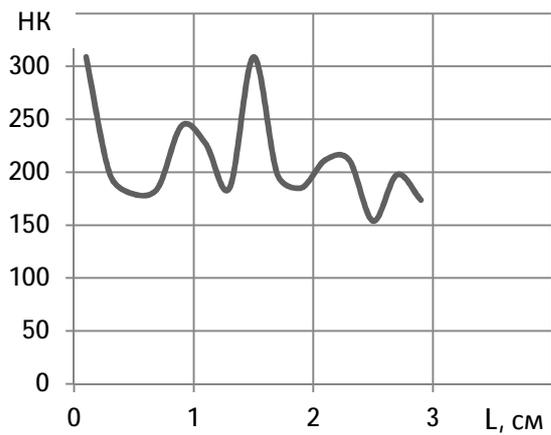
Рис. 5.29. Характерное изменение микротвердости на образце №36 (B95) в неупрочненной зоне 1 (а) и упрочненной зоне 2 (б, в)



а

б

Рис. 5.30. Характерное изменение микротвердости на образце №36 (Д16Т) в неупрочненной зоне 1 (а) и упрочненной зоне 2 (б)



а

б

Рис. 5.31. Характерное изменение микротвердости на образце №34 (Д16Т) в неупрочненной зоне 1 (а) и упрочненной зоне 2 (б)

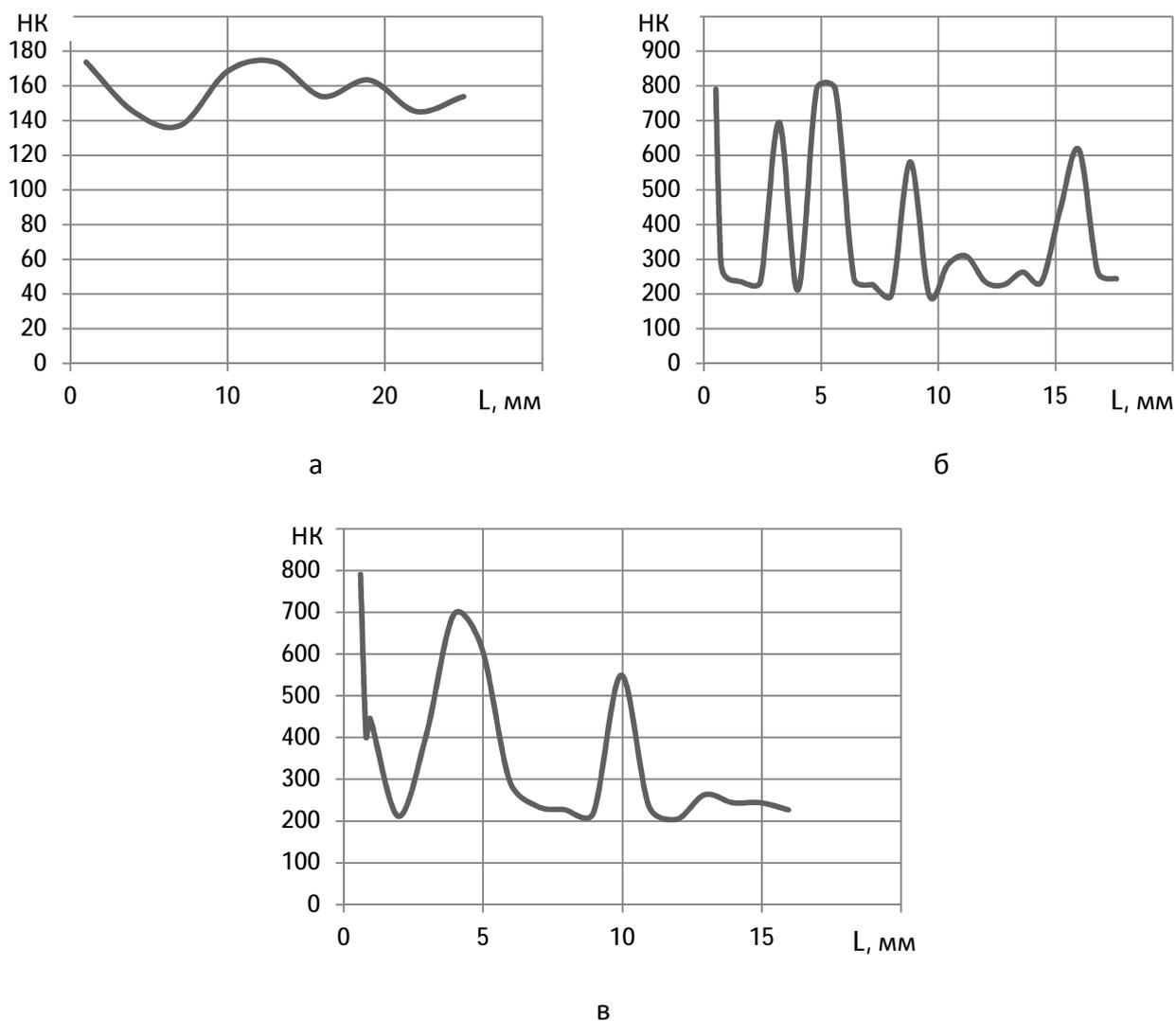


Рис. 5.32. Характерное изменение микротвердости на образце №15 (Д16Т) в неупрочненной зоне 1 (а) и упрочненной зоне 2 (б, в)

Термоэкспозиция (ТЭ), проведенная на образцах после ПДО, заметно снижает значения микротвердости в обоих рассмотренных сплавах. Почти во всех образцах – № 34, 36, 39 (сплав В95) и 36, 34, 30, 37 (сплав Д16Т) – ТЭ приводит к падению микротвердости практически до исходного состояния (зона 1).

Таблица 5.9

Значения микротвердости в зонах 1 и 2 цилиндрических образцов и режимы обработки

№ образца	Материал	Режим обработки	Микротвердость в зоне 1, НК	Микротвердость в зоне 2, НК
20	В95	ПДО	190-280	450-3600
23	В95	ПДО	190-285	500-1050
34	В95	ПДО+ТЭ	180-285	50-300
21	В95	ПДО	225-285	225-2460, 245-2200
25	В95	ПДО	210-285	400-2200, 450-1800
36	В95	ПДО+ТЭ	225-285	200-285, 210-240
39	В95	ПДО+ТЭ	210-265	225-340, 225-290
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	145-310	210-310
21	Д16Т	ПДО	135-275	210-285
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	150-310	245-330
15	Д16Т	ПДО	140-175	200-790, 210-700
23	Д16Т	ПДО	140-210	200-270, 210-270
30	Д16Т	ПДО+ТЭ	150-225	200-445, 200-375
37	Д16Т	ПДО+ТЭ	150-310	225-330, 185-320
8	В95	Неупр.	220-265	190-300
17	В95	ПДО	185-285	550-1040
11	Д16Т	Неупр.	140-285	185-310
27	Д16Т	ПДО	140-185	90-265

Прокомментируем этот экспериментально наблюдаемый факт. Упрочненные образцы в условиях термоэкспозиции выдерживались в течение 100 часов при $T = 125$ °С. При этой температуре сплав Д16Т проявляет свойства ползучести. Подробно сведения о ползучести Д16Т приведены в предыдущей главе 4. Свойством ползучести при этой температуре обладает и сплав В95. За счет самоуравновешенных остаточных напряжений в упрочненных образцах в приповерхностном слое развиваются несовместные деформации ползучести и происходит перераспределение остаточных напряжений – их релаксация (уменьшение их величины по модулю). Это приводит к тому, что наведенные остаточные напряжения могут существенно уменьшиться по модулю, в некоторых случаях – полностью релаксировать. В частности, в работе [83] приведены эпюры остаточных напряжений после термоэкспозиции для образцов из сплавов В95 и Д16Т (рис. 6.9 из [83]), которые существенно отличаются от соответствующих эпюр после процедуры упрочнения (рис. 6.8 из [83]), т.е. действительно наблюдается интенсивная релаксация остаточных напряжений. Поскольку произошла практически их полная релаксация, то микротвердость после ТЭ в образцах стала почти такой же, как в исходном (неупрочненном) состоянии. Таким образом, увеличение микротвердости после поверхностного упрочнения действительно связано в первую очередь с наличием остаточных напряжений.

Усталостные испытания, проведенные на указанных образцах, привели к значительному росту микротвердости в зоне, непосредственно прилегающей к месту разрушения. Первые 4 замера, произведенные с шагами 350, 150, 150, 500 мкм соответственно, указывают, что радиус области, на которую влияет пластическая деформация, составляет около 700-900 мкм. В этой зоне микротвердость выросла в 1,5 – 3 раза.

Рассмотрим теперь влияние упрочнения и режимов испытаний на другой важный параметр качества поверхности цилиндрических образцов – шероховатость. Схема измерения шероховатости приведена на рис. 5.33. Базовая длина каждого замера – 12,5 мм.

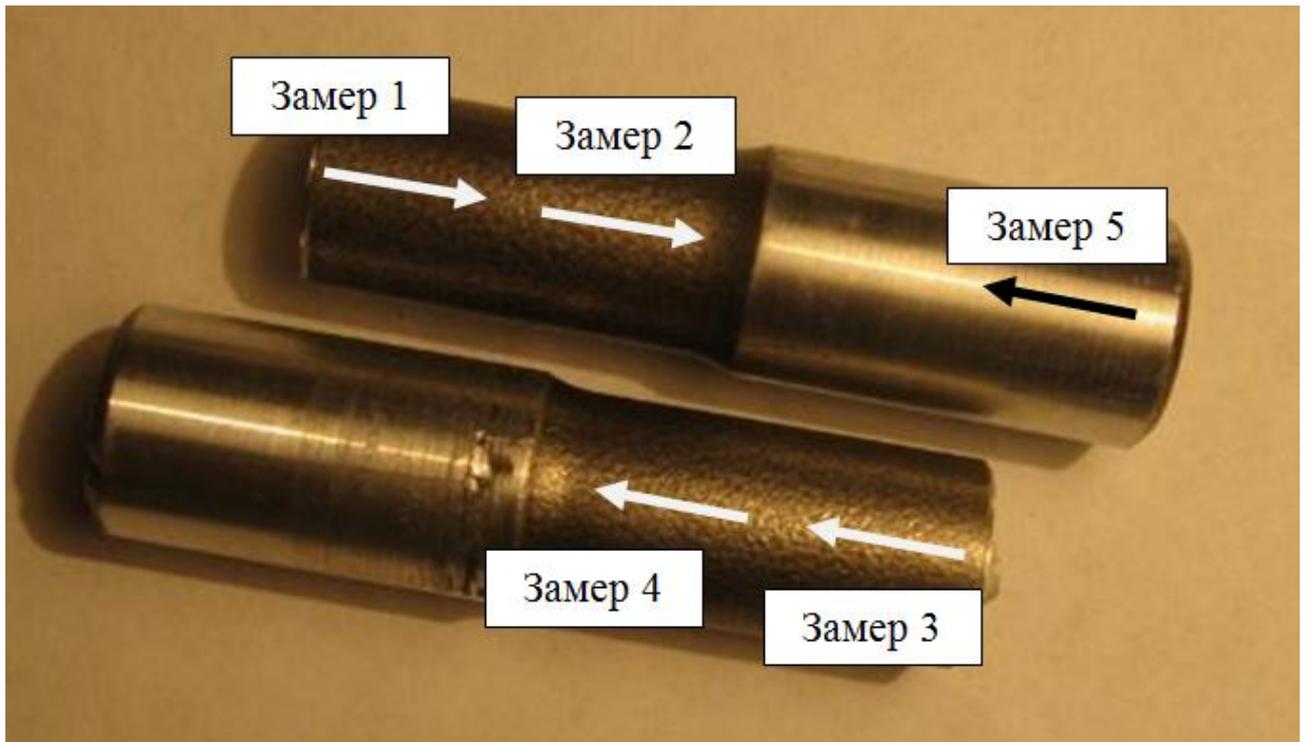


Рис. 5.33. Схема измерения шероховатости

Исследование шероховатости в указанных зонах производилось по следующим параметрам:

R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам (в расчет формулы входят $H_{i \max}$ – отклонение пяти наибольших максимумов профиля, $H_{i \min}$ – отклонение пяти наибольших минимумов профиля);

R_q – среднее квадратичное отклонение профиля.

Результаты измерения шероховатости представлены в таблице 5.10. Анализ подвергались профилограммы с указанием нормального профиля и параметрами шероховатости поверхности, внешний вид одной из которых приведен на рис. 5.34.

Таблица 5.10 содержит информацию по параметрам R_z и R_q , полученным на замерах 1-4 (рис. 5.33). Замер 5 был произведен на образцах № 17 и № 21. В результате были получены следующие значения: $R_z = 5,05$ мкм, $R_q = 1,02$ мкм на образце № 17; $R_z = 4,94$ мкм, $R_q = 1,01$ мкм на образце № 21. Вид профилограммы в зоне 1 приведен на рис. 5.35.

Величины R_z и R_q на неупрочненных образцах имеют сравнительно небольшие значения. Пневмодробеструйная обработка значительно искажает рельеф образцов и способствует сильному росту шероховатости, что наглядно представлено в таблице 5.10. Типичные профилограммы неупрочненной и упрочненной (ПДО) областей для сплава В95 продемонстрированы на рис. 5.36 и 5.37 соответственно. Установлено, что термоэкспозиция не влияет на изменение шероховатости поверхности. Вид профилограммы после режима ПДО+ТЭ показан на рис. 5.38. Следует отметить, что профилограммы приведены в разных масштабах. Значение масштаба (VER. и HOR.) указано на рисунках.

Таблица 5.10

Результаты измерения шероховатости

№ образца	Материал	Режим обработки	Замер 1		Замер 2		Замер 3		Замер 4	
			R_z , мкм	R_q , мкм						
20	В95	ПДО	27,20	5,77	25,31	5,44	20,75	4,87	18,99	4,35
23	В95	ПДО	23,93	5,29	21,30	4,76	21,34	5,01	22,91	5,53
34	В95	ПДО+ТЭ	20,39	4,87	22,53	4,97	16,27	3,41	19,94	4,33
36	Д16Т	ПДО+ТЭ	26,54	5,63	24,47	5,83	21,01	4,99	23,94	5,85
21	Д16Т	ПДО	21,18	4,89	23,81	5,39	24,28	5,33	24,44	5,92
34	Д16Т	ПДО+ТЭ	28,18	6,39	24,80	5,37	25,35	5,43	21,99	4,63
8	В95	Неупр.	9,63	2,00	5,74	1,10	10,12	2,16	9,61	2,02
17	В95	ПДО	23,41	5,47	22,80	5,09	21,81	5,38	19,52	4,05
11	Д16Т	Неупр.	6,31	1,19	9,91	2,00	14,74	3,25	8,26	1,53
27	Д16Т	ПДО	23,10	5,39	24,16	6,09	23,03	5,31	21,45	4,91

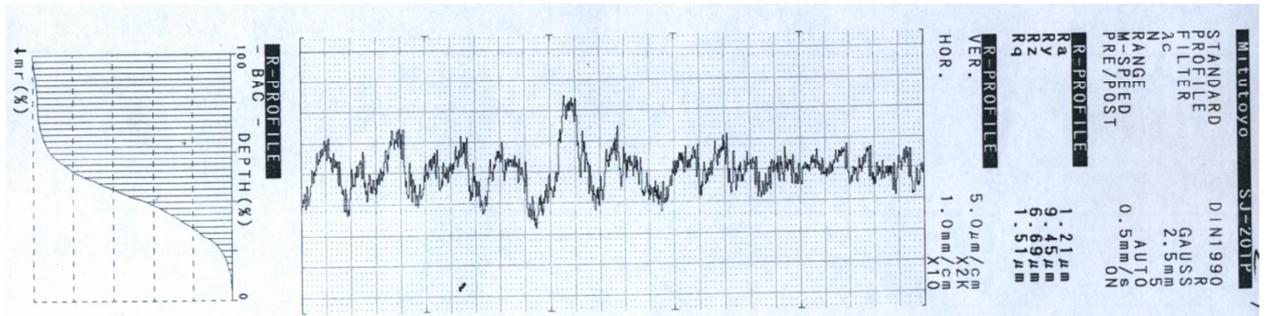


Рис. 5.34. Внешний вид профилограммы, используемой для расшифровки значений шероховатости

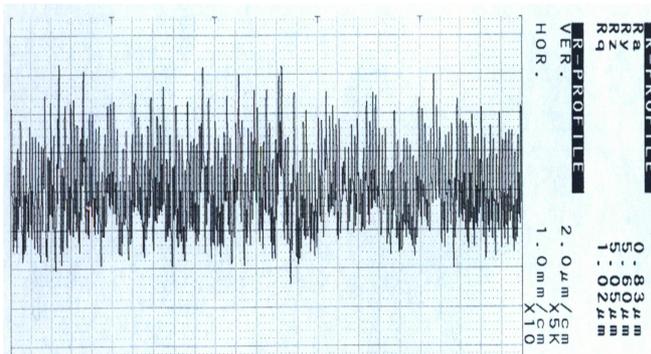


Рис. 5.35. Профиль поверхности в зоне 1 (образец № 17)

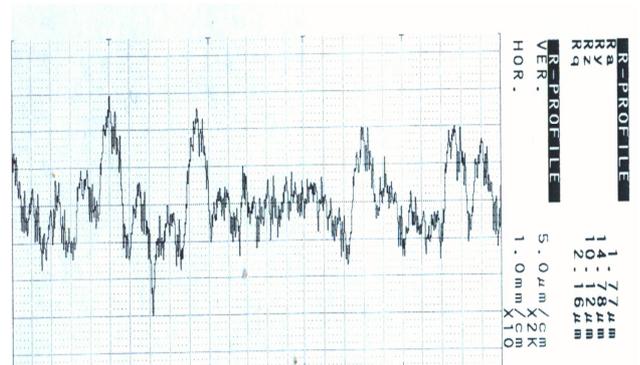


Рис. 5.36. Профиль поверхности в зоне 2, не подвергнутой упрочнению (образец № 8)

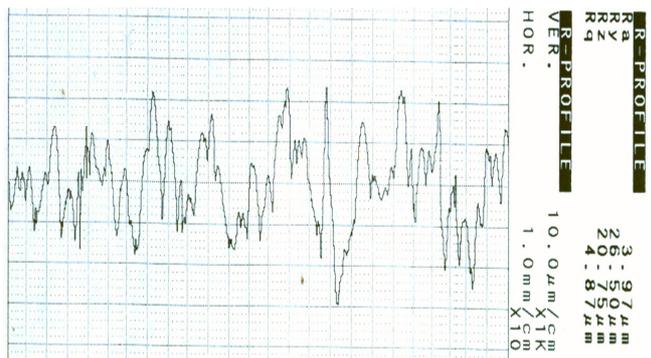


Рис. 5.37. Профиль поверхности в зоне 2 после ПДО (образец № 20)

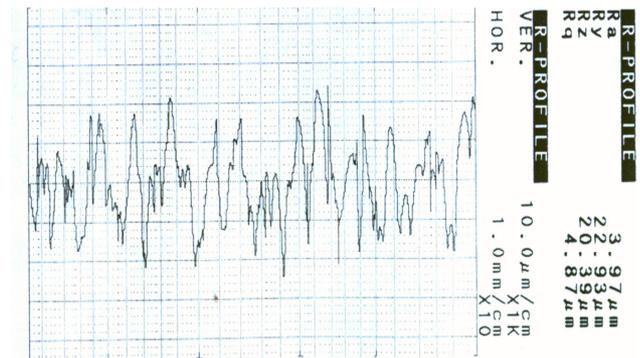


Рис. 5.38. Профиль поверхности в зоне 2 после ПДО+ТЭ (образец № 34)

Следующий этап работы заключался в исследовании микротвердости по Кнуппу по глубине шлифа (по глубине упрочненного слоя). В качестве примера

на рис. 5.39 и 5.40 приведено распределение микротвердости по глубине (от поверхности) L поперечного шлифа для образцов №23 (сплав В95) и №21 (сплав Д16Т) после дробеструйной обработки, из которых следует, что в упрочненной зоне значения микротвердости заметно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах. Этот факт еще раз подтверждает, что, по-видимому, увеличение микротвердости связано с наличием значительных остаточных сжимающих напряжений в поверхностно упрочненном слое образцов. Действительно, как следует из экспериментальных данных работы [83], область сжимающих остаточных напряжений для упрочненных цилиндрических образцов из этих сплавов составляет до 400 – 500 мкм, и именно такой же является область повышенных значений микротвердости (см. рис. 5.39, 5.40).

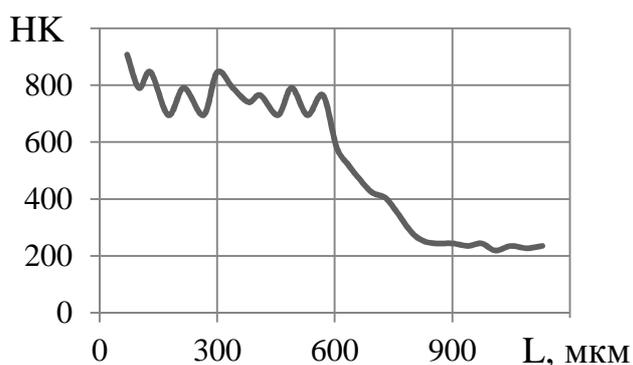


Рис. 5.39. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа в образце № 23 (В95, ПДО)

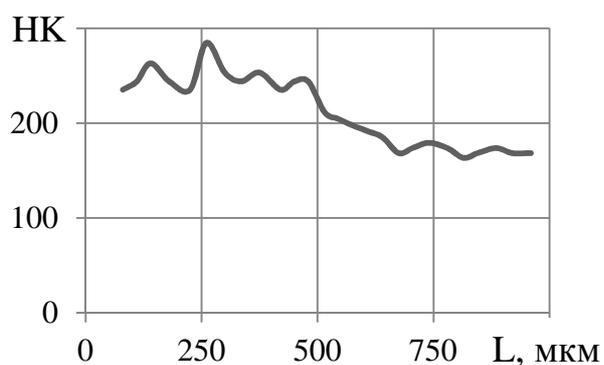


Рис. 5.40. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа в образце № 21 (Д16Т, ПДО)

Представляет определенный интерес влияние режимов испытаний на структуру металла в упрочненной поверхностной зоне и неупрочненном «ядре» цилиндрического образца. Для определения изменения микроструктуры материала после ПДО и термоэкспозиции в поперечном сечении образцов был проведен металлографический анализ. Он показал, что образцы после ПДО имеют три характерные зоны (в качестве примера на рис. 5.41 представлен образец №15 из сплава Д16Т):

1) поверхностная (рис. 5.41, а), которая представляет собой темно-травящийся слой. Здесь структура очень дефектна за счет высокой степени наклепа. Сплав В95 имеет более темную поверхностную зону (это связано с большим значением микротвердости в этом сплаве). Глубина этого слоя составляет примерно 540 мкм для сплава В95 (рис. 5.39) и около 480 мкм для сплава Д16Т (рис. 5.40);

2) основная (рис. 5.41, б), протяженность которой составляет порядка 40 мм. Основная зона также содержит большое количество дефектов, которые в основном сконцентрированы по границам зерен. Зерна имеют вытянутую форму по образующей цилиндрического образца, приобретенную вследствие упрочнения;

3) глубинная (рис. 5.41, в), в которую плавно переходит основная зона. Эта область характеризуется сравнительно небольшим количеством дефектов. Здесь зерна имеют форму, сформированную в ходе получения прессованного полуфабриката, из которого изготовлены образцы.

Влияние ТЭ на изменение микроструктуры показано на рис. 5.42. Установлено, что поверхностная зона становится более светлой, так как нагрев до 125 °С в течение 100 ч приводит к уменьшению дефектности. В основной зоне уменьшается травимость границ зерен, что связано с уменьшением их дефектности. На рис. 5.42 (б, в) четко просматриваются темные фазы состава, которые представляют собой первичные интерметаллиды литейного происхождения.

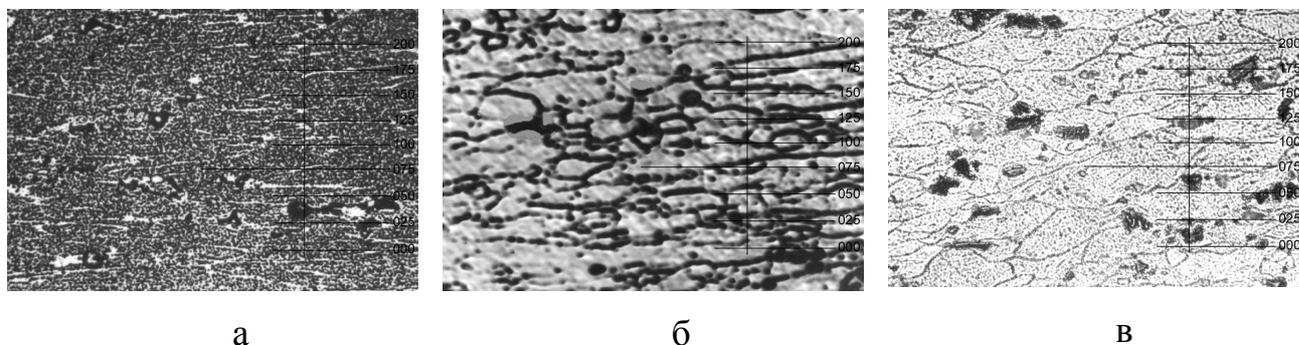


Рис. 5.41. Три зоны в поперечном сечении образца №15 (Д16Т) после ПДО. х400

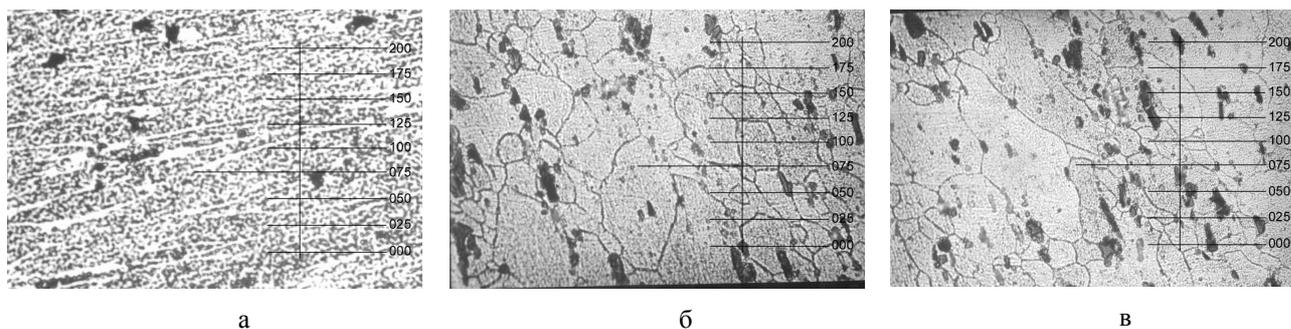


Рис. 5.42. Три зоны в поперечном сечении образца №34 (Д16Т) после ПДО+ТЭ.
х400

Таким образом, при упрочнении и при термоэкспозиции происходят изменения в металле образца в радиальном направлении. Но эти изменения, по нашему мнению, не вносят существенных изменений в характеристики микротвердости.

В заключении с позиций механики деформируемого твердого тела рассмотрим на качественном уровне причины, приводящие к существенному повышению значений микротвердости в поверхностно упрочненных плоских и цилиндрических деталях по сравнению с неупрочненными образцами и возврату практически к исходным значениям микротвердости в упрочненных образцах (т.е. к микротвердости неупрочненных образцов) после процедуры термоэкспозиции.

Основная причина повышения значений микротвердости после упрочнения, на наш взгляд, состоит в наличии поля остаточных сжимающих напряжений в тонком приповерхностном слое (после процедуры гидро- или пневмодробеструйной обработки поверхности этот слой может составлять 300-500 мкм, см., например, рис. 4.4 – 4.7). Согласно нормативным документам (ГОСТ Р ИСО 4545-1-2015. Материалы металлические. Определение твердости по Кнупу. Часть 1. Метод испытаний.), которыми автор диссертации руководствовался при проведении экспериментальных исследований микротвердости (методика описана в главе 2), метод испытаний применим при нагрузке на вдавливаемую пирамидку от 0,09807 до 19,614 Н и его применяют для отпечатков с

диагональю d (см. рис. 2.5 и рис. 2.6) не более 0,02 мм, т.е. не более 20 мкм. При этом, согласно указанному ГОСТу, соотношение глубины проникновения t пирамидки в материал и длины большей диагонали отпечатка d составляет примерно 1:30, т.е. величина t составляет величину около 1 мкм. Поэтому решающее влияние на глубину проникновения t будут оказывать сжимающие остаточные напряжения, концентрация которых максимальна у поверхности упрочненных деталей. Поясним это с помощью рисунка 5.43. При вдавливании пирамидки в неупрочненный образец сопротивление внедрению идет только от внутренних реактивных сил N , порожденных реакцией деформируемого материала (рис. 5.43, а). При этом, поскольку пирамидка является «абсолютно жестким» штампом, то деформирование идет в режиме жесткого нагружения, т.е. при заданных перемещениях наклонных граней реакция материала N направлена ортогонально этой наклонной грани. Если же вдавливание идет в упрочненный слой детали, то кроме реактивных усилий N , на грани действуют еще и «начальные» нагрузки S , вызванные остаточными сжимающими напряжениями (рис. 5.43, б), проекции которых на нормаль к наклонной поверхности пирамидки не нулевые (особенно на гранях, составляющих угол в 130°) и которые дополнительно препятствуют внедрению пирамидки. Поэтому величина внедрения t_2 в упрочненную поверхность (см. рис. 5.43, б) будет меньше величины внедрения t_1 в неупрочненную поверхность (см. рис. 5.43, а) при одной и той же нагрузке P , приложенной к пирамидке. Это, в свою очередь, дает меньшее значение большей диагонали d отпечатка пирамидки (рис. 2.6) и кажущееся увеличение значения микротвердости для упрочненного образца, рассчитываемого по формуле (см. стр. 47)

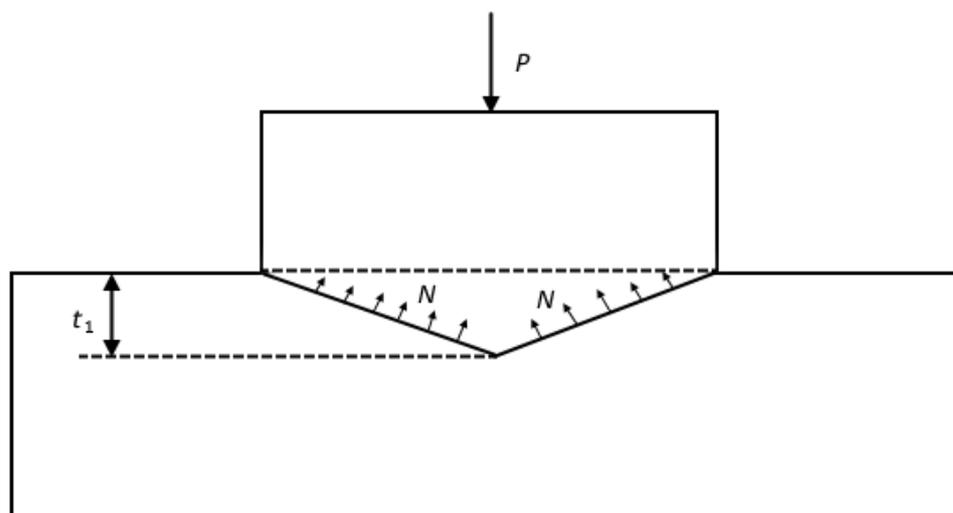
$$\text{НК} = 14230 \cdot \frac{P}{d^2}.$$

В случае термоэкспозиции упрочненного образца вследствие ползучести под действием самоуравновешенных остаточных напряжений происходит существенная (а в некоторых случаях и практически полная) релаксация остаточных напряжений. Это приводит к существенному снижению (или полному

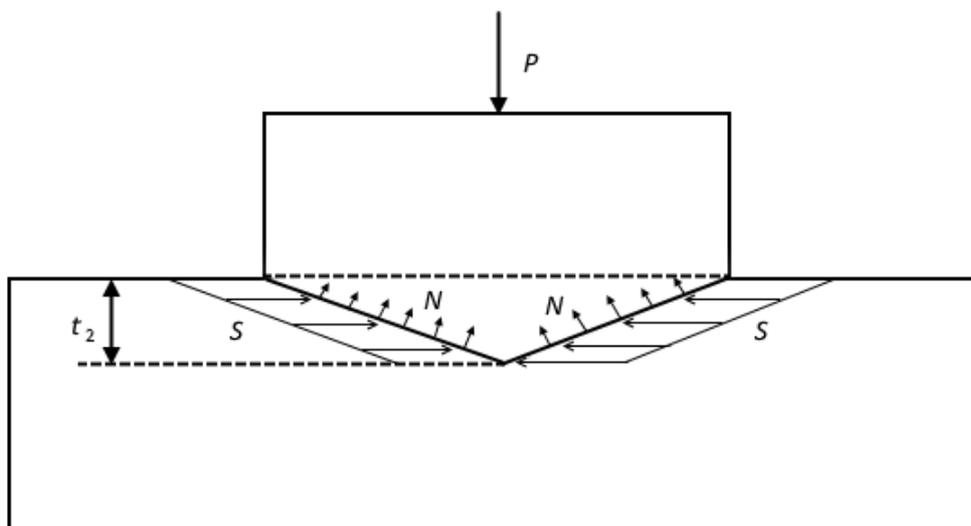
устранению) реактивных сил S , вызванных остаточными напряжениями, и мы снова получаем схему, представленную на рис. 5.43, а. Поэтому микротвердость упрочненного образца после термоэкспозиции и ползучести становится практически такой же, как и у неупрочненного образца, что и наблюдалось во всех экспериментальных исследованиях данного типа в настоящей диссертационной работе.

Конечно, высказанное качественное описание требует подтверждения количественными результатами трудоемких теоретических расчетов о внедрении штампа в упрочненную поверхность, но это не является целью данной работы.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования и качественные схемы внедрения пирамидки в материал упрочненных и неупрочненных образцов позволяют сделать следующие выводы. Увеличение микротвердости в упрочненных образцах по сравнению с неупрочненными связано с наличием остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое. Уменьшение же микротвердости упрочненных образцов после термоэкспозиции до значений в неупрочненных образцах в первую очередь связано с релаксацией остаточных напряжений вследствие ползучести материала. Изменения в структуре материала при упрочнении и при термоэкспозиции, по всей видимости, не оказывают существенного влияния на величину микротвердости.



а



б

Рис. 5.43. Схема силовых факторов, действующих при вдавливании пирамидки:
а – неупрочненный образец; б – упрочненный образец

Выводы по пункту 5.3

1. Макроструктурный анализ полых цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т выявил наличие очага разрушения на всех исследуемых образцах и ругчистый излом в виде ступенек. В упрочненном слое наблюдалось большое количество трещин.

2. Пневмодробеструйная обработка приводит к увеличению микротвердости, в особенности на образцах из сплава В95, где ее значения возрастают на 1000-3000 НК по сравнению с исходной микротвердостью.

3. Термоэкспозиция снижает значения микротвердости практически до исходного уровня, что особенно характерно для образцов из сплава В95.

4. На расстоянии 700-900 мкм от зоны разрушения после усталостных испытаний сказывается влияние пластической деформации, которая приводит к сильному скачку микротвердости.

5. Пневмодробеструйная обработка увеличивает шероховатость поверхностного слоя; последующая термоэкспозиция не оказывает влияния на характеристики шероховатости.

6. Распределение микротвердости по глубине поперченного шлифа упрочненных цилиндрических образцов крайне неоднородное: в упрочненной (периферийной) зоне значения микротвердости значительно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах.

7. Микроструктурный анализ поперечного сечения образцов выявляет наличие трех ярковыраженных зон: сильно наклепанной поверхностной, дефектной основной и слабо дефектной глубинной (центральной).

8. Термоэкспозиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры. Внешним проявлением этого является уменьшение значений микротвердости в процессе термоэкспозиции вследствие релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое, что обусловлено деформацией ползучести и процессом перераспределения напряжений во времени.

5.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ И МНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ГАЛТЕЛЬЮ

В данном разделе исследовались образцы, изготовленные из углеродистой стали 20 диаметром 12 мм с галтелью радиуса r (величина радиуса менялась от 0,5 мм до 5 мм), которая является концентратором напряжений. Чертеж образца представлен на рис. 5.44, внешний вид – на рис. 5.45. Образцы предварительно были упрочнены с помощью пневмодробеструйной обработки (ПДО), где значение давления воздуха составляло 0,25 МПа, а диаметр дроби составлял 1,5-2,5 мм. Часть образцов была неупрочненной. Все образцы были подвергну-

ты усталостным испытаниям, проведенным на машине МУИ-600. Таблица 5.11 содержит основную информацию по упрочнению и усталостным испытаниям образцов.

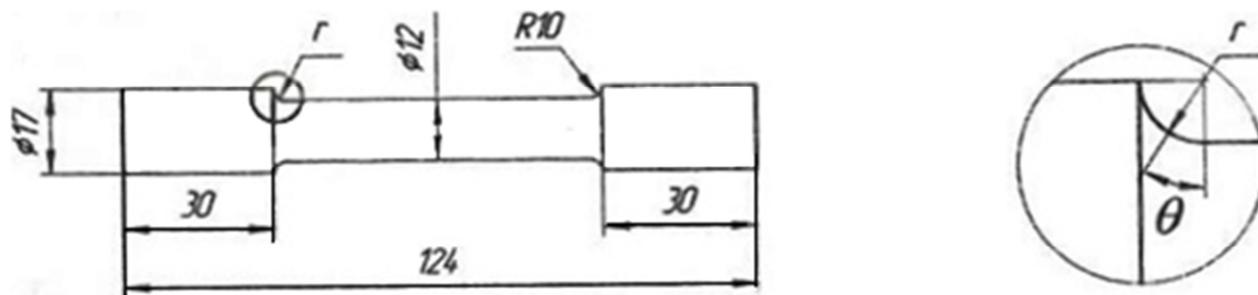


Рис. 5.44. Образец с галтелью



Рис. 5.45. Внешний вид исследуемых образцов

В работе [19] детально представлены результаты исследований по определению предела выносливости σ_{-1} неупрочненных и упрочненных образцов. Было выявлено, что с ростом радиуса галтели предел выносливости как неупрочненных, так и упрочненных образцов возрастает.

При визуальном осмотре, а также при исследовании с помощью микроскопа изломов образцов (упрочненных и неупрочненных) было установлено, что зарождение усталостной трещины, как правило, происходило не в наименьшем сечении (переход поверхности малого цилиндра в галтель), а в сечении, расположенном под некоторым углом θ к наименьшему сечению (см. рис. 5.44). Внешний вид усталостных трещин представлен на рис. 5.46.

Данные по упрочнению и усталостным испытаниям образцов

№ обр.	Режим упрочнения	Радиус галтели R, мм	Диам. образца до надреза, мм	Условн. обозначение образца
1	Неупрочн.	0,5	11,97	20-0,5-1
3	Неупрочн.	0,5	12,00	20-0,5-3
6	Упрочн.	0,5	12,04	20-0,5-6
8	Упрочн.	0,5	11,94	20-0,5-8
10	Упрочн.	0,5	12,12	20-0,5-10
4	Неупрочн.	1,0	12,08	20-1,0-4
6	Упрочн.	1,0	12,11	20-1,0-6
7	Упрочн.	1,0	12,10	20-1,0-7
9	Упрочн.	1,0	12,03	20-1,0-9
3	Неупрочн.	3,0	11,88	20-3,0-3
4	Неупрочн.	3,0	11,98	20-3,0-4
9	Неупрочн.	3,0	12,03	20-3,0-9
5	Неупрочн.	5,0	12,02	20-5,0-5
6	Упрочн.	5,0	11,99	20-5,0-6
7	Упрочн.	5,0	12,02	20-5,0-7

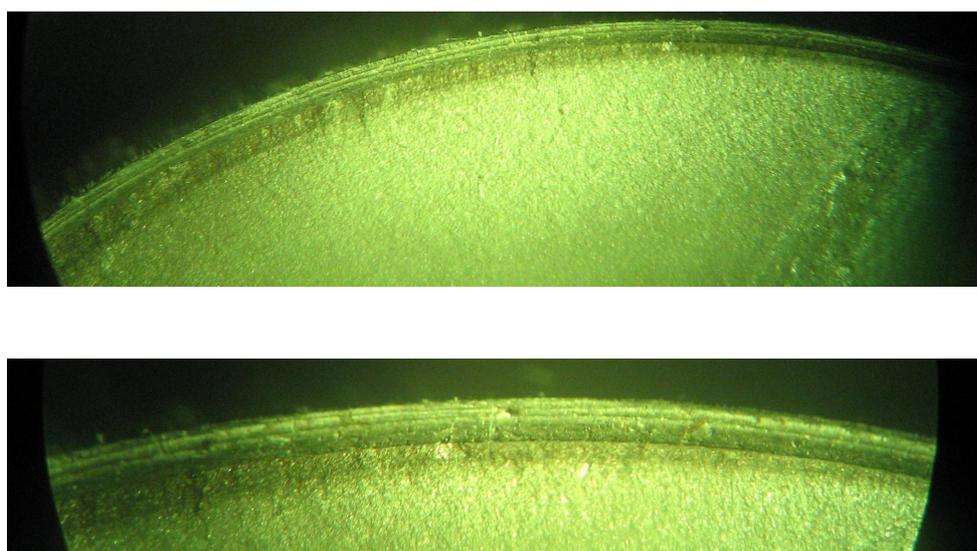


Рис. 5.46. Зарождение усталостных трещин

С целью определения характера образования усталостных трещин, полученных при испытаниях образцов с галтелями, были выполнены расчеты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса NASTRAN/PATRAN. Анализ результатов расчета показал, что положение точки на поверхности галтельного перехода с наибольшими напряжениями $\sigma_{\text{Гал}}^{\text{наиб}}$ зависит от радиуса галтели r . При увеличении радиуса r точка $\sigma_{\text{Гал}}^{\text{наиб}}$ смещается к наименьшему сечению образца с галтелью. Следовательно, положение опасного сечения детали с галтельным переходом, определяемое углом θ (см. рис. 5.45), зависит от радиуса галтели, что необходимо учитывать в расчетах на прочность.

Влияние радиуса галтели на положение опасного сечения в образце проанализировано также по данным распределения микротвердости, измеренным по Кнуппу. Исследование микротвердости по Кнуппу осуществлялось на микротвердомере ММ6 фирмы “Leitz” (рис. 2.3). Методика измерения микротвердости подробно описана в пункте 2.1.2.

Следует отметить, что допускается незначительная погрешность в полученных результатах, так как на точность измерений оказывает влияние неровность рельефа. Первоначально образцы имели цилиндрическую форму. Для точечного контакта индентора и исследуемой области на шлифовальном круге удалялась часть образца из зоны зажима (рис. 5.45). Схема измерения микротвердости показана на рис. 5.47. Необходимо обратить внимание на то, что неупрочненные образцы имеют ярко выраженные следы от резца. На таких образцах имеются зоны выступов и впадин с различным уровнем микротвердости. Поэтому большая диагональ отпечатка ориентирована вдоль оси образца. Измерение микротвердости осуществляли в осевом направлении, двигаясь от зоны разрушения. Первый замер значения микротвердости был выполнен примерно на расстоянии 250-400 мкм от галтели, так как на меньшем расстоянии поверхность образца имеет коническую форму, и найти отпечаток в фокусе микроскопа не представлялось возможным. На участке I, протяженностью от

2,6 до 3,5 мм, шаг измерений составлял 70-100 мкм, на участке II, протяженностью 0,9-1,6 мм, – 120-150 мкм. На основном III участке замеры осуществляли через 0,5-1 мм.



Рис. 5.47. Схема измерения микротвердости

Данные по измерению микротвердости в анализируемых образцах и характерное распределение НК в зависимости от режима и радиуса галтели представлены в таблице 5.12 и на рис. 5.48 – 5.51. Выявлено, что на всех образцах после проведения испытаний на усталость наблюдается монотонное снижение значений микротвердости от зоны разрушения до основания образца. Однако следует отметить, что на значение микротвердости в зоне разрушения заметно влияет радиус галтели. Выявлено, что чем больше величина галтели, тем меньше значение микротвердости в зоне разрушения образца. Так, неупрочненные образцы с номерами 20-0,5-3 (радиус – 0,5 мм) и 20-5-5 (радиус 5 мм) имеют значения микротвердости в зоне разрушения 2300 и 1000 НК соответственно (таблица 5.12 и рис. 5.48, 5.49).

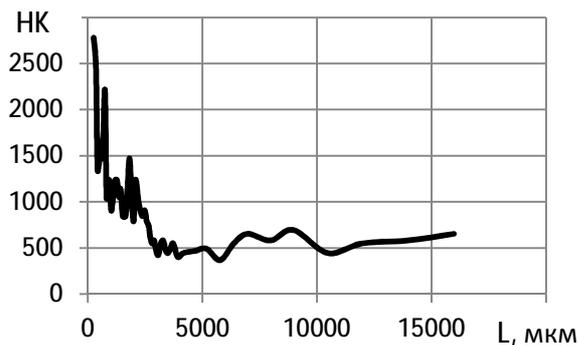


Рис. 5.48. Распределение микротвердости на образце с радиусом галтели $r = 0,5$ мм

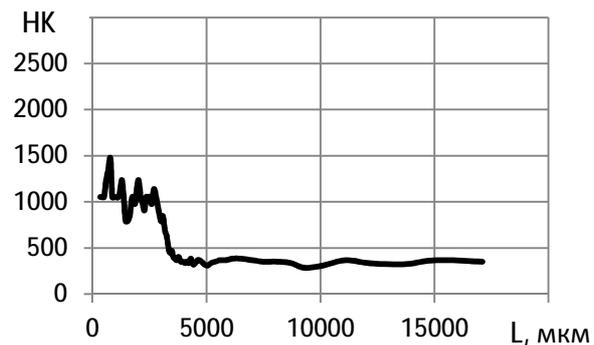


Рис. 5.49. Распределение микротвердости на образце с радиусом галтели $r = 5$ мм

Таблица 5.12

Результаты измерения микротвердости

№ образца	Значение микротвердости в зоне разрыва, НК	Протяженность зоны	
		I, мм	II, мм
20-0,5-1	2300	2,60	0,90
20-0,5-3	2300	2,60	1,00
20-0,5-6	2300	2,69	0,98
20-0,5-8	2500	2,63	1,04
20-0,5-10	2700	2,65	0,95
20-1,0-4	1800	2,80	1,04
20-1,0-6	1900	2,83	1,03
20-1,0-7	1900	2,92	1,10
20-1,0-9	2000	3,07	0,99
20-3,0-3	1500	3,07	1,21
20-3,0-4	1500	3,06	1,06
20-3,0-9	1500	3,50	1,50
20-5,0-5	1000	3,09	1,10
20-5,0-6	1100	3,80	1,54
20-5,0-7	1100	3,915	1,59

Установлено, что ПДО не оказывает сильного влияния на значение микротвердости в зоне разрыва, однако в пределах III участка (основная матрица – рис. 5.47) микротвердость после ПДО возрастает на 100-200 единиц. Данный факт проиллюстрирован на рис. 5.50, 5.51, где показано распределение микротвердости на образцах с галтелями одного радиуса в неупрочненном (рис. 5.50) и упрочненном (рис. 5.51) состояниях.

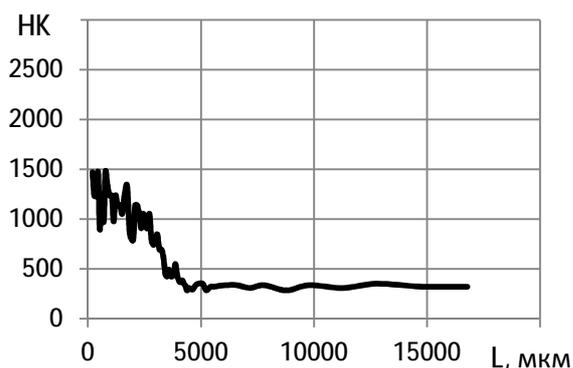


Рис. 5.50. Распределение микротвердости на неупрочненном образце с радиусом галтели $r = 3$ мм

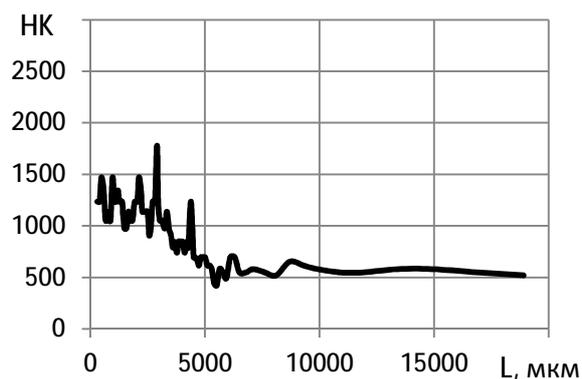


Рис. 5.51. Распределение микротвердости на упрочненном образце с радиусом галтели $r = 3$ мм

Отмечено, что протяженность зоны I (рис. 5.47) несколько возрастает с увеличением радиуса галтели. Если на образцах с $r = 0,5$ мм длина зоны пластической деформации составляет примерно 2,6 мм и при $r = 5$ мм ее значение уже увеличивается до 3,9 мм.

Установлено также, что протяженность зоны II (рис. 5.47), где наблюдается плавное, монотонное уменьшение микротвердости, также возрастает при увеличении радиуса галтели.

Таким образом, данные по измерению микротвердости подтверждают выдвинутую в работе [19] гипотезу: положение опасного сечения в образце с галтельным переходом зависит от радиуса галтели. С увеличением радиуса опасное сечение перемещается в сторону наименьшего сечения образца.

5.5. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5

1. Выполнен комплексный анализ влияния режимов поверхностно пластического упрочнения ПДО, термоэкспозиции, многоциклового нагружения на характеристики микротвердости, шероховатости и микроструктуру материала упрочненных плоских и цилиндрических образцов.

2. Установлено повышение значений микротвердости для всех типов упрочненных образцов по сравнению с неупрочненными. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа упрочненных цилиндрических образцов крайне неоднородное: в упрочненной периферийной зоне значения микротвердости существенно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах.

3. Установлено, что многоцикловые испытания на усталость и ползучесть при термоэкспозиции приводят к уменьшению микротвердости в упрочненных образцах вплоть до исходного состояния неупрочненных образцов, что связано с релаксацией наведенных в процессе упрочнения остаточных напряжений.

4. Пневмодробеструйная обработка увеличивает шероховатость поверхностного слоя образцов всех типов. Последующие испытания на усталость, термоэкспозиция и ползучесть не оказывают влияния на данные параметры.

5. Микроструктурный анализ поперечного сечения упрочненных образцов позволил выявить наличие трех ярковыраженных зон: сильно наклепанной поверхностной, дефектной основной и слабо дефектной глубинной.

6. Термоэкспозиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры. Внешним проявлением этого является уменьшение значений микротвердости в процессе термоэкспозиции вследствие релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое, что обусловлено деформацией ползучести и процессом перераспределения напряжений во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен комплексный анализ результатов экспериментальных исследований стохастических полей реологических деформаций, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, позволивший установить, что развитие деформаций пластичности и ползучести идет независимо для каждой из этих компонент. Это позволяет строить физические стохастические уравнения состояния независимо для каждой из компонент и, в частности, не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических образцов.

2. Впервые экспериментально исследовано распределение локальной деформации ползучести по пространственно-временным координатам в пределах одного поверхностно упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125$ °С и установлено, что в пределах одного образца разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней может достигать 150-200%.

3. Предложены феноменологические стохастические уравнения ползучести для сплава Д16Т при $T = 125$ °С в условиях одноосного и сложного напряженного состояний; разработана новая методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая существенно сократить объем экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней (среднеинтегральной) величины. Аналитически описан случайный процесс развития деформации ползучести во времени при одноосном растяжении.

4. Разработана методика численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий, реализованная для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения при температуре $T = 125$ °С, на основании которой исследована релаксация остаточных

напряжений и впервые получены статистические оценки для полей остаточных напряжений в процессе ползучести в различные временные сечения. Установлено, что если ориентироваться на нижнюю границу доверительного интервала, то максимальное значение осевой компоненты сжимающих остаточных напряжений в процессе ползучести за 100 часов в зависимости от приложенной нагрузки [353; 420] МПа уменьшилось (по модулю) от 4 раз до порядка по сравнению с начальным состоянием после упрочнения. Полученные результаты свидетельствуют о крайне отрицательном влиянии растягивающей нагрузки на устойчивость (способность сохраняться) остаточных напряжений в образцах из сплава Д16Т в исследованном температурно-силовом диапазоне внешних нагрузок.

5. Выполнен комплексный анализ влияния режимов поверхностно пластического упрочнения пневмодробеструйной обработкой, термоэкспозиции, многоциклового нагружения на характеристики микротвердости, шероховатости и микроструктуру материала упрочненных плоских и цилиндрических образцов. Установлено повышение значений микротвердости для всех типов упрочненных образцов по сравнению с неупрочненными, связанное в основном с наличием сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое упрочненных образцов. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа упрочненных цилиндрических образцов крайне неоднородное: в упрочненной периферийной зоне значения микротвердости существенно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах. Показано, что многоцикловые испытания на усталость и ползучесть при термоэкспозиции приводят к уменьшению микротвердости в упрочненных образцах вплоть до исходного состояния неупрочненных образцов, что в основном связано с релаксацией наведенных в процессе упрочнения остаточных напряжений.

6. Микроструктурный анализ поперечного сечения упрочненных образцов позволил выявить наличие трех ярковыраженных зон: сильно наклепанной поверхностной, дефектной основной и слабо дефектной глубинной. Термоэкс-

позиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры. Внешним проявлением этого является уменьшение значений микротвердости в процессе термоэкспозиции вследствие релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое, что в основном обусловлено деформацией ползучести и процессом перераспределения напряжений во времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов, А. Н. Исследование остаточных напряжений в конструкциях сложной формы методом конечных элементов / А. Н. Архипов, Ю. М. Темис // Проблемы прочности – 1980 – № 7. – С. 81-84.

2. Астафьев, В. И. Описание процесса разрушения в условиях ползучести / В. И. Астафьев // Изв. АН СССР. МТТ – 1986 – №4. – С. 15-17.

3. Бадаев, А. Н. К вопросу об определении функции распределения параметров уравнения состояния ползучести / А. Н. Бадаев // Проблемы прочности, 1984 – №12. – С. 22-26.

4. Бадаев, А. Н. Стохастическое прогнозирование ползучести жаропрочных сплавов с использованием метода Монте-Карло / А. Н. Бадаев // Проблемы прочности – 1985 – №2. – С. 7-10.

5. Бадаев, А.Н. О статистическом моделировании характеристик ползучести конструкционных материалов / А. Н. Бадаев, Е. Р. Голубовский, М. В. Баумштейн, И. П. Булыгин // Проблемы прочности – 1982 – №5. – С. 16-20.

6. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер – М.:Машгиз, 1963. – 232 с.

7. Бойцов, В. Б. Расчётный анализ образования остаточных напряжений при виброупрочнении / В. Б. Бойцов, Д. Э. Скрипкин, А. О. Чернявский // Динамика, прочность и износостойкость машин, № 5. Челябинск: ИПМ АН СССР. – 1985. – С. 69-72.

8. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. / В. В. Болотин – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

9. Бордаков, С. А. Разработка методов расчёта остаточных напряжений и сопротивления усталости в неоднородном поверхностном слое элементов конструкций: Автореф. дис... д-ра техн. наук / С. А. Бордаков – Самара, 2000. – 37 с.

10. Борисов, С. П. Неустановившаяся ползучесть и релаксация напряжений сплава АК4-1 в вероятностном аспекте / С. П. Борисов, Н. И. Борщев, М. Н. Степнов, И. И. Хазанов // Проблемы прочности. – 1975. – №1. – С. 30-33.

11. Букатый, С. А. Исследования влияния упрочнения методом выглаживания шариком на образование забоин кромок лопаток ГТД / С. А. Букатый, А. С. Букатый, А. А. Иванов // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, «ХАИ». – 2011. – №7/84. – С. 7-11.

12. Букатый, С. А. Расчетно-экспериментальное исследование влияния упрочнения методом ППД на малоцикловую усталость деталей ГТД с концентраторами напряжений / С. А. Букатый, А. М. Портер, Д. П. Лешин, А. С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. – 2011. – №3(27), Ч.2. – С. 40-46.

13. Букатый С. А. Исследование долговечности валов и дисков ГТД в условиях совместного действия малоциклового усталости и длительной прочности / С. А. Букатый, А. М. Портер, А. А. Округин, А. Л. Водолагин // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – Орел. – 2012. – №4(294). – С. 45-52.

14. Вайнштейн. А. А. Основы теории упругости и пластичности с учетом микроструктуры материала / А. А. Вайнштейн, В. Н. Алехин // Учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ. – 2006. – 384 с.

15. Вакулюк, В. С. Исследование влияния остаточных напряжений на предел выносливости образцов с галтельными переходами различного радиуса / В. С. Вакулюк, В. В. Лунин, А. С. Злобин, А. А. Ефимова, А. П. Морозов // Тезисы докладов Пятой международной научно-практической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении», Киев, Украина. – 2014. – С. 35-36.

16. Вакулюк, В. С. Анализ влияния схемы упрочнения поверхности образцов с галтелями на распределение остаточных напряжений в их опасном сечении / В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, В. В. Лунин, Д. Ю. Кожевников, А. П.

Морозов // Международный научно-технических сборник «Надежность и долговечность машин и сооружений». Киев, Украина. – 2015 – № 40. – С. 36-42.

17. Вакулюк, В. С. Изменение положения опасного сечения в деталях с галтельными переходами в зависимости от радиуса галтели / В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, В. В. Лунин, Ю. С. Кузнецов, А. П. Морозов // Тезисы докладов Пятой международной научно-практической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении», Киев, Украина. – 2014. – С. 39-40.

18. Вакулюк, В. С. Анализ влияния схемы упрочнения поверхности образцов с галтелями на распределение остаточных напряжений в опасном сечении / В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, О. Ю. Семенова, В. В. Лунин, А. П. Морозов // Международная научно-техническая конференция «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций». Киев, Украина. – 2013. – С. 48-50.

19. Вакулюк, В. С. Исследование методом конечно-элементного моделирования характера образования изломов образцов с галтелями по результатам испытаний на усталость / В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, А. А. Филиппов, Д. Ю. Кожевников, А. П. Морозов // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Самара. – 2013. – С. 75-79.

20. Вакулюк, В. С. Влияние глубины залегания сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации напряжений / В. С. Вакулюк, В. К. Шадрин, Е. А. Денискина, В. П. Сазанов, А. П. Морозов // Международный научно-технических сборник «Надежность и долговечность машин и сооружений». Киев, Украина. – 2015. – № 40. – С. 30-35.

21. Вакулюк, В. С. Влияние глубины залегания сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации напряжений / В. С. Вакулюк, В. К. Шадрин, Е. А. Денискина, М. О. Перфильева, А. П. Морозов // Международная научно-техническая конференция «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций». Киев, Украина. – 2013. – С. 55-57.

22. Вакулюк, В. С. Зависимость предела выносливости детали при опережающем поверхностном пластическом деформировании от толщины упрочненного слоя / В. С. Вакулюк, В. К. Шадрин, О. Ю. Семенова, М. О. Перфильева, А. П. Морозов // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО Кузнецов и 70-летию СГАУ. Самара, СГАУ. – 2012. – С. 161-163.
23. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель – М.: Наука, 1969. – 576с.
24. Вильдеман, В. Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В. Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов – М.: Наука, 1997. – 228 с.
25. Волков, С. Д. Статистическая теория прочности / С. Д. Волков. – М.: Машгиз, 1960. – 173 с.
26. Волков, С. Д. Статистическая механика композитных материалов / С. Д. Волков, В. П. Ставров. – Минск: Изд-во БГУ, 1978. – 208 с.
27. Голудин, Е. П. Вариант стохастической модели неизотермической ползучести поливинилхлоридного пластика / Е. П. Голудин // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1(18). – С. 114-121.
28. ГОСТ 4784-74. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 10 с.
29. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 38 с.
30. Дудкин, С. А. Феноменологические стохастические модели энергетического типа в условиях неупругого реологического деформирования и разрушения материалов: дис. ... канд. физ-мат. наук / С. А. Дудкин – Самара: 2003. – 196 с.
31. Иванов, С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С. И. Иванов // В сб.: Остаточные напряжения. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т. – 1974. – Вып. 53. – С. 32-42.

32. Иванов, С. И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высоконагруженных резьбовых деталей / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов., Б. В. Минин, В. А. Кирпичёв, Е. П. Кочеров, В. В. Головкин. Самара: СНЦ РАН, 2015. – 170 с.

33. Иванов, С. И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С. И. Иванов, М. П. Шатунов, В. Ф. Павлов // В сб.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Вып. 1. Куйбышев: КуАИ. – 1974. – С. 88-95.

34. Ильин, В. Н. Ползучесть элементов конструкций со случайными параметрами / В. Н. Ильин, В. В. Кашелкин, С. А. Шестериков // Изв. АН СССР. МТТ. – 1982. – № 4. – С. 159-167.

35. Исуткина, В. Н. Сравнительный анализ решений стохастической краевой задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы на основе методов малого параметра и Монте-Карло / В. Н. Исуткина, А. Ю. Маргаритов // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2006. – № 43. – С. 116-123.

36. Кирпичев, В. А. Оценка погрешности расчёта критической глубины нераспространяющейся трещины усталости в упрочнённых деталях / В. А. Кирпичев, О. Ю. Семёнова, Е. А. Денискина, А. П. Морозов // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Десятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. Самара: СамГТУ. – 2016 – С. 109-113.

37. Коваленко, Л. В. Моделирование краевого эффекта в задаче о растяжении стохастически неоднородной полосы при ползучести / Л. В. Коваленко, Н. Н. Попов // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1(18). – С. 85-94.

38. Коваленко, Л. В. Решение плоской стохастической краевой задачи ползучести / Л. В. Коваленко, Н. Н. Попов, В. П. Радченко // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73, № 6. – С. 1009-1016

39. Ковпак, В. И. Унифицированный подход к прогнозированию ползучести. Вопросы жаропрочных материалов в статистическом аспекте / В. И. Ковпак, А. Н. Бадаев // Унифицированные методы определения ползучести и длительной прочности. – М.: Изд-во стандартов. – 1986. – С. 51-62.

40. Колотникова, О. В. Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах / О. В. Колотникова // Проблемы прочности. – 1983. – № 2. – С. 112–114.

41. Кравченко, Б. А. Влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя на долговечность деталей газотурбинных двигателей / Б. А. Кравченко, В. Г. Круцило // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. – 1998. – № 5. – С. 71-77.

42. Кравченко, Б. А. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надёжности машин / Б. А. Кравченко, В. Г. Круцило, Г. Н. Гутман // Самара: СамГТУ. – 2000. – 216 с.

43. Кузнецов, В. А. Некоторые стохастические задачи теории ползучести и их приложение к расчетам конструкций на надежность: дисс. канд. физ.-мат. наук / В. А. Кузнецов – Самара, 1977. – 167 с.

44. Кузнецов, В. А. О надежности элементов стержневых конструкций в условиях неустановившейся ползучести / В. А. Кузнецов // Механика. Сб. научных трудов. Куйбышев: КПТИ. – Вып. 8. – 1975. – С. 67-70.

45. Кузнецов, В. А. О надежности статически определяемых стержневых систем в условиях ползучести / В. А. Кузнецов, Ю. П. Самарин // Контактные и циклические задачи теплопроводности. Вопросы прочности и работоспособности инструментальных материалов. Куйбышев: КПТИ. – 1975. – С. 73-78.

46. Кузнецов, В. А. Расчет надежности стержневых элементов конструкции, работающих с ограничением по напряжению в условиях ползучести при заданной величине деформации / В. А. Кузнецов, Ю. П. Самарин // Математическая физика. – 1977. – С. 107-110.

47. Лепин, Г. Ф. Ползучесть металлов и критерий жаропрочности / Г. Ф. Лепин – М.: Металлургия, 1976. – 345 с.

48. Лиманова, Л. В. Расчёт тепловых и механических полей при термопластическом упрочнении пластины с двумя цилиндрическими отверстиями с учётом зависимости свойств материала от температуры / Л. В. Лиманова // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 1999. – № 7. – С. 63-70.

49. Локощенко, А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов / А. М. Локощенко. – М.: Физматлит, 2016. – 504 с.

50. Локощенко, А. М. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении / А. М. Локощенко, С. А. Шестериков // ПМТФ. – 1980. – №3. – С. 155-159.

51. Ломакин, В. А. Проблемы механики структурно-неоднородных тел / В. А. Ломакин // Изв. АН СССР. МТТ. – 1978. – №6. – С. 45-52.

52. Ломакин, В. А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел. / В. А. Ломакин – М.: Наука, 1970. – 139 с.

53. Лунин В.В. Методы расчёта напряжённо-деформированного состояния и предела выносливости упрочнённых цилиндрических деталей с концентраторами напряжений при ползучести: дис. ... канд. техн. наук. Сам. гос. техн. университет, Самара, 2015.170 с.

54. Мавлютов, Р. Р. Остаточные напряжения и деформации при упрочнении отверстий / Р. Р. Мавлютов, Т. Н. Мардимасова, В. С. Куликов // Прочность конструкций. Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – 1996. – С. 90-97.

55. Морозов, А. П. Анализ влияния пластической деформации на состояние поверхностного слоя плоских образцов из алюминия АД-1 / А. П. Морозов // I Международная научно-практическая конференция «Студенчество в науке – инновационный потенциал будущего». Материалы конференции. Набережные Челны. – 2013. – С. 304-306.

56. Морозов, А. П. Анализ влияния различной степени пластической деформации на изменение физико-механического состояния поверхностного слоя

/ А. П. Морозов // V Всероссийская студенческая научно-практическая конференция «Студенчество в науке – инновационный потенциал будущего». Материалы конференции. Набережные Челны. – 2012. – С. 112-113.

57. Морозов, А. П. Анализ изменения физико-механических характеристик поверхностного слоя в зависимости от различных режимов испытаний на пластичность и ползучесть / А. П. Морозов // V Международная школа «Физическое материаловедение», VI Всероссийская молодежная научная конференция "Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений". Тезисы докладов. Тольятти. – 2011. – С. 232.

58. Морозов, А. П. Влияние пластической деформации на параметры физико-механического состояния поверхностного слоя плоских образцов из алюминия АД-1 / А. П. Морозов // Materialy VIII Mezinarodni vedecko-prakticka conference "Vedecky prumysl Evropskeho kontinentu – 2012". 27 listopadu – 05 prosincu 2012 roku. Praha. – 2012. – P. 23-25.

59. Морозов, А. П. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на металлофизические характеристики цилиндрических образцов из сплава Д16Т / А. П. Морозов // Материалы международной научной конференции «Образование и наука без границ». Польша. – 2011. – С. 65-66.

60. Морозов, А. П. Влияние режимов пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на изменение физико-механического состояния поверхностного слоя / А. П. Морозов // II межвузовская научно-практическая конференция «Новые технологии и инновационные разработки». Материалы конференции. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. – 2010. – С. 108-109.

61. Морозов, А. П. Влияние схемы упрочнения поверхности образцов из стали 20 на распределение остаточных напряжений в опасном сечении образцов / А. П. Морозов // Материалы III Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». Курск. – 2013. – С. 133-136.

62. Морозов, А. П. Воздействие многоцикловых усталостных испытаний и температурных выдержек на изменение физико-механических свойств поверхностного слоя образцов из сплава Д16Т и В95 / А. П. Морозов // Тезисы докладов XXXVII Самарской областной студенческой научной конференции. Часть I. Общественные, естественные и технические науки. Самара. – 2011. – С. 249.

63. Морозов, А. П. Воздействие многоцикловых усталостных испытаний на изменение физико-механических свойств упрочненного слоя образцов из сплава ЭИ698ВД / А. П. Морозов // Сборник материалов международной научно-технической студенческой конференции «Научному прогрессу – творчество молодых». Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2010. – С. 278-279.

64. Морозов, А. П. Изменение физико-механического состояния поверхностного слоя алюминиевых образцов под влиянием режимов пневмодробеструйной обработки / А. П. Морозов // Тезисы докладов международной молодежной научной конференции «Научному прогрессу – творчество молодых». Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2011. – С. 230-231.

65. Морозов, А. П. Изменение физико-механического состояния упрочненного слоя образцов из сплава ЭИ698ВД под воздействием многоцикловых усталостных испытаний / А. П. Морозов // Тезисы докладов XXXVI Самарской областной студенческой научной конференции. Часть I. Общественные, естественные и технические науки. Самара. – 2010. – С. 269-270.

66. Морозов, А. П. Исследование характеристик поверхностного слоя алюминия В95 и Д16Т после пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции / А. П. Морозов // Сборник тезисов XIX международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов». Самара. – 2015. – С. 227.

67. Морозов, А. П. Оценка влияния пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на изменение физико-механических характеристик поверхностного слоя / А. П. Морозов // III Общероссийская студенческая электронная

научная конференция «Студенческий научный форум 2011». Москва: Российская академия естествознания. – 2011. – С. 233.

68. Морозов, А. П. Перспектива применения алюминиевых сплавов В95 и Д16Т в машиностроении / А. П. Морозов // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации». Грозный. – 2013. – С. 217-222.

69. Морозов, А. П. Распределение остаточных напряжений в опасном сечении образцов из стали 20 при испытании на усталость / А. П. Морозов // VI Международная школа с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение». Тольятти. – 2013. – С. 73-75.

70. Морозов, А. П. Регрессионная модель деформации участков образцов Д16Т в процессе ползучести / А. П. Морозов // Материалы международной научно-практической конференции «Современное научное знание: теория, методология, практика». Смоленск. – 2015. – С. 66-67.

71. Морозов, А.П. Экспериментальное исследование влияния усталостных испытаний на характеристики упрочненного слоя плоских образцов из сплава ЭИ698ВД / А. П. Морозов // Труды 5-го Международного форума (10-й Международной конференции) «Актуальные проблемы современной науки. Естественные науки. Части 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика». Самара: СамГТУ. – 2009. – С. 135-143.

72. Морозов, А. П. Экспериментальное исследование характеристик поверхностного слоя технически чистого алюминия АД-1 в условиях склерономного и реономного деформирования материала / А. П. Морозов // Тезисы докладов XXXVIII Самарской областной студенческой научной конференции. Самара. – 2012. – С. 274.

73. Морозов, А. П. Комплексное исследование остаточных напряжений, предела выносливости и физико-механического состояния материала поверхностно упрочненных цилиндрических образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т / А. П. Морозов, В. В. Лунин // VII Российская научно-техническая кон-

ференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение». Тезисы докладов. Екатеринбург. – 2012. – С. 140.

74. Морозов А. П. Анализ параметров поверхностного слоя алюминиевых образцов после пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции / А. П. Морозов, В. А. Смыслов // Materiały IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «perspektywiczne opracowania są nauką i technikami-2013». 07 - 15 listopada 2013 roku. Volume 39. Techniczne nauki. Польша. – 2013. – С. 32-33.

75. Мрочек, Ж. А. Остаточные напряжения. / Ж. А. Мрочек, С. С. Макаревич, Л. М. Кожуро – Мн.: Технопринт, 2003. – 352 с.

76. Мухин, В. С. Релаксационная стойкость остаточных напряжений в стали 13Х12НВМФА / В. С. Мухин, В. Г. Саватеев // Проблемы прочности. – 1973. – № 5. – С. 88-91.

77. Никитенко, А. Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов / А. Ф. Никитенко – Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, НГАСУ, 1997. – 280 с.

78. Новожилов, В. В. Микронапряжения в конструктивных материалах. / В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашевич – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.

79. Одинг, И. А. Теория ползучести и длительной прочности металлов / И. А. Одинг, В. С. Иванова, В. В. Бурдукский, В. Н. Геминев. – М.: Металлургия, 1959. – 488 с.

80. Павлов, В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В. Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

81. Павлов, В. Ф. Исследование методом первоначальных деформаций сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей из стали 40Х и 30ХГСА / В. Ф. Павлов, В. П. Сазанов, А. П. Морозов, А. В. Письмаров // Труды Десятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Часть 1. Самара: СамГТУ. – 2016. – С. 161-165.

82. Павлов, В. Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. С. Вакулюк // Самара: Издательство СНЦ РАН. – 2012. – 125 с.

83. Павлов, В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. Б. Иванов – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

84. Павлов, В. Ф. Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / А. К. Столяров, В. С. Вакулюк, В. А. Кирпичев. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

85. Подзей, А. В. Остаточные напряжения (теория и приложения) / А. В. Подзей, Ю. И. Няшин, П. В. Трусов. – М.: Наука, 1982. – 110 с.

86. Поздеев, А. А. К статистическому анализу вязкоупругих свойств полимеров / А. А. Поздеев, С. В. Мельников, Ф. И. Доронин // Вопросы механики полимеров и систем. – 1976. – С. 50-55.

87. Попов, Н. Н. Решение нелинейной стохастической задачи ползучести для толстостенной трубы методом малого параметра / Н. Н. Попов, А. А. Должковой // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2002. – № 13. – С. 84-89.

88. Попов, Н. Н. Решение пространственной нелинейной задачи ползучести для среды со случайными реологическими характеристиками / Н. Н. Попов, С. А. Забелин // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2008. – № 1(16). – С. 79-85.

89. Попов, Н. Н. Оценка надежности осесимметричных стохастических элементов конструкций при ползучести по теории выбросов / Н. Н. Попов, Л. В. Коваленко // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2012. – № 2(27). – С. 72-77.

90. Попов, Н. Н. Исследование полей напряжений вблизи границы стохастически неоднородной полуплоскости при ползучести / Н. Н. Попов, Ю. П. Самарин // ПМТФ. – 1981. – №1. – С. 159-164.

91. Попов, Н. Н. Оценка надежности стержневых элементов конструкции при ползучести по теории выбросов / Н. Н. Попов, Г. А. Павлова, М. В. Шершнева // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5(21). – С. 117-124.

92. Попов, Н. Н. Аналитическое решение стохастической краевой задачи установившейся ползучести для толстостенной трубы / Н. Н. Попов, В. П. Радченко // Прикл. математика и механика. – 2012. – Т. 76, № 6. – С. 1036-1044.

93. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов – М.: Наука, 1979. – 744 с.

94. Работнов, Ю. Н. Опытные данные по ползучести технических сплавов и феноменологические теории ползучести (обзор) / Ю. Н. Работнов // Журнал прикл. мех. и техн. физики. – 1965. – №1. – С. 141-159.

95. Работнов, Ю. П. Ползучесть элементов конструкций / Ю. П. Работнов – М.: Наука, 1966. – 752 с.

96. Радченко, В. П. Математическая модель неупругого деформирования и разрушения металлов при ползучести энергетического типа / В. П. Радченко // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. Вып. 4. Самара: СамГТУ. – 1996. – С. 43-63.

97. Радченко, В. П. Энергетический вариант одноосной теории ползучести и длительной прочности / В. П. Радченко // ПМТФ. – 1991. – №4. – С. 172-179.

98. Радченко, В. П. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полупространстве в условиях ползучести / В. П. Радченко, Т. И. Бочкова, В. В. Цветков // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2015. – № 3(19). – С. 504-522.

99. Радченко, В. П. Экспериментальное исследование и анализ полей неупругих микро- и макродеформаций сплава АД-1 / В. П. Радченко, С. А. Дудкин, М. И. Тимофеев // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. Вып. 16. Самара: СамГТУ. – 2002. – С. 111-117.

100. Радченко, В. П. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкции / В. П. Радченко, Ю. А. Еремин. – М.:Машиностроение-1, 2004. – 265 с.

101. Радченко, В. П. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения / В. П. Радченко, В. А. Кирпичёв, В. В. Лунин // Вест. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. – 2012. – № 3(35). – С. 147-154.

102. Радченко, В. П. Экспериментальное исследование кинетики остаточных напряжений в упрочненных полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при осевом растяжении в условиях ползучести / В. П. Радченко, В. А. Кирпичев, В. В. Лунин, А. П. Филатов, А. П. Морозов // Вест. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 290-305.

103. Радченко, В. П. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести / В. П. Радченко, Е. П. Кочеров, М. Н. Саушкин, В. А. Смыслов // ПМТФ. – 2015. – Т.56, №2. – С. 169-177.

104. Радченко, В. П. Оценка надежности элементов конструкций в условиях ползучести на основании стохастических обобщенных моделей / В. П. Радченко, С. Н. Кубышкина, М. В. Шершнева // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2012. – № 3(28). – С. 53-71.

105. Радченко, В. П. Анализ влияния пластической деформации на изменение физико-механического состояния поверхностного слоя плоских образцов из алюминия АД-1 / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Часть 1. Самара: СамГТУ. – 2013. – С. 184-187.

106. Радченко, В. П. Влияние многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя плоских образцов / В. П.

Радченко, А. П. Морозов // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. – 2009. – Вып. 3(25). – С. 158-165.

107. Радченко, В. П. Влияние поверхностного упрочнения и усталостных испытаний на металлофизические характеристики плоских образцов из сплава ЭИ698ВД / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Секция Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. Часть 1. Самара: СамГТУ. – 2010. – С. 287-294.

108. Радченко, В. П. Влияние режимов упругопластического нагружения и испытаний на ползучесть на характеристики поверхностного слоя образцов из алюминия АД-1 / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Том 18, вып. 4. – С. 1823-1824.

109. Радченко, В. П. Влияние температурных полей и многоцикловых испытаний на физико-механическое состояние поверхностно упрочненного слоя деталей / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Международная научно-техническая конференция «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций». Материалы конференции. Киев, Украина. – 2013. – С. 239-241.

110. Радченко, В. П. Изменение структуры и физико-механических характеристик поверхностного слоя под влиянием пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции / В. П. Радченко, А. П. Морозов // *Materialy VI miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji "Nauka I wyksztaicenie bez granic – 2010". 07-15 grudnia 2010 roku. Volume 23. Techniczne nauki.* Болгария. – P. 88-90.

111. Радченко, В. П. Изменение физико-механического состояния поверхностного слоя алюминиевых образцов под влиянием различной степени пластической деформации / В. П. Радченко, А. П. Морозов // XVIII Междуна-

родная конференция «Физика прочности и пластичности материалов». Самара: СамГТУ. – 2012. – С. 48.

112. Радченко, В. П. Исследование изменения макроструктуры металла упрочненных цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 107-112.

113. Радченко, В. П. Исследование характеристик поверхностного слоя алюминиевых образцов в условиях склерономного и реономного деформирования и разрушения материала / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Труды восьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Часть 1. Самара: СамГТУ. – 2011. – С. 174-180.

114. Радченко, В. П. Исследование характеристик поверхностного слоя образцов из алюминия АД-1 в зависимости от режимов упругопластического нагружения и испытаний на ползучесть / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Materialy VII Mezinardni vedecko-prakticka conference «Vedecky prumysl Evropskeho kontinentu – 2011». Прага, Чехия. – 2011. – С. 13-15.

115. Радченко, В.П. Кинетика параметров физико-механического состояния поверхностно-упрочнённого слоя цилиндрических образцов вследствие усталостных испытаний и температурного нагружения / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Материалы V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН. – 2011. – С. 173.

116. Радченко, В. П. Комплексное исследование физико-механического состояния поверхностного слоя после различных режимов испытаний / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Симпозиум с международным участием «Самолетостроение России». Самара: СГАУ. – 2012. – С. 331-333.

117. Радченко, В. П. Оценка влияния многоцикловых усталостных испытаний на металлофизические свойства плоских образцов из сплава ЭИ698ВД / В. П. Радченко, А. П. Морозов // XXI Уральская школа металлоспециалистов. Материалы международной конференции «Актуальные проблемы физического металловедения стали и сплавов». Магнитогорск. – 2012. – С. 177-179.

118. Радченко, В. П. Экспериментальное исследование влияния пневмодробеструйной обработки, температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т / В. П. Радченко, А. П. Морозов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5(21). – С. 222-228.

119. Радченко, В. П. Исследование кинетики физико-механических параметров упрочненных образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний / В. П. Радченко, А. П. Морозов, В. В. Лунин // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2012. – № 1 (26). – С. 123-131.

120. Радченко, В. П. Стохастическая модель для расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полом цилиндра в условиях ползучести / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин, А. П. Морозов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №1. – С. 181-207.

121. Радченко, В. П. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах / В. П. Радченко, В. Ф. Павлов, М. Н. Саушкин // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 1. – С. 130-147.

122. Радченко, В. П. Нелинейная стохастическая задача ползучести неоднородной плоскости с учетом поврежденности материала / В. П. Радченко, Н. Н. Попов // ПМТФ. – 2007. – Т. 48, № 2. – С. 140-146.

123. Радченко, В. П. Стохастические характеристики полей напряжений и деформаций при установившейся ползучести стохастически неоднородной плоскости / В. П. Радченко, Н. Н. Попов // Изв. ВУЗов: Машиностроение. – 2006. – № 2. – С. 3-11.

124. Радченко, В. П. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин // Извест. вузов. Машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 3-17.

125. Радченко, В. П. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.

126. Радченко, В. П. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочнённом изделии цилиндрической формы при ползучести / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 90-99.

127. Радченко, В. П. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в полом поверхностно упрочненном цилиндрическом образце / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77, № 1. – С. 143-152.

128. Радченко, В. П. Математическое моделирование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин, Т. И. Бочкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 93-112.

129. Радченко, В. П. Стохастическая модель неизотермической ползучести и длительной прочности / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин, Е. П. Голудин // Прикл. механика и техн. физика. – 2012. – Т. 53, № 2. – С. 167-174.

130. Радченко, В. П. Влияние термоэкспозиции на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползуче-

сти / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин, В. В. Цветков // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57, № 3. – С. 196-207.

131. Радченко, В. П. Разработка автоматизированной системы построения моделей неупругого деформирования металлов на основе методов непараметрического выравнивания экспериментальных данных / В. П. Радченко, А. В. Симонов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. Вып. 7. – 1999. – С. 51-62.

132. Радченко, В. П. Стохастический вариант одномерной теории ползучести и длительной прочности / В. П. Радченко, А. В. Симонов, С. А. Дудкин // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. Вып.12. – 2001. – С. 73-84.

133. Радченко, В. П. Об одном подходе к решению стохастической краевой задачи для толстостенной трубы под действием внутреннего давления в условиях реологического деформирования и разрушения материалов / В. П. Радченко, А. В. Симонов, С. Н. Кубышкина // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды одиннадцатой межвузовской конференции. Часть 1. Самара: СамГТУ. – 2001. – С. 152-156.

134. Радченко, В. П. Кинетика напряженного-деформированного состояния в поверхностно упрочненном цилиндрическом образце при сложном напряженном состоянии в условиях ползучести / В. П. Радченко, В. В. Цветков // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2014. – Т. 34, №1. – С. 93-108.

135. Реков, А. М. Неоднородность микродеформаций ползучести / А. М. Реков, А. А. Вайнштейн, В. Т. Корниенко // Проблемы прочности. – 1984. – №10. – С. 119-121.

136. Самарин, Ю. П. О применении стохастических уравнений в теории ползучести материалов / Ю. П. Самарин // Изв. АН СССР. МТТ. – 1974. – №1. – С. 88-94.

137. Самарин, Ю. П. Основные феноменологические уравнения ползучести материалов: дисс. ... докт. техн. наук / Ю. П. Самарин. – Куйбышев, 1973. – 289 с.

138. Самарин, Ю. П. Стохастические механические характеристики и надежность конструкций с реологическими свойствами / Ю. П. Самарин // Ползучесть и длительная прочность конструкций. Сб. научн. тр. Куйбышев: КПТИ. – 1986. – С. 8-17.

139. Самарин, Ю. П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами / Ю. П. Самарин – Куйбышев: Куйбыш. госуниверситет. – 1979. – 84 с.

140. Самарин, Ю. П. Обобщенные модели в теории ползучести конструкций / Ю. П. Самарин, Я. М. Клебанов // Самара: Поволж. отд. академии РФ – СамГТУ. – 1994. – 197 с.

141. Самарин, Ю. П. О стохастических уравнениях ползучести / Ю. П. Самарин, О. В. Сорокин // Механика. Сб. научных трудов. Куйбышев: КПТИ. – 1972. – Вып.4. – С. 84-92.

142. Саушкин, М. Н. Схема расчета полей напряжений в цилиндрическом образце с учетом организации процесса поверхностного пластического деформирования / М. Н. Саушкин, О. С. Афанасьева, Е. В. Дубова, Е. А. Просвиркина // Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2008. – №1(16). – С. 85-89.

143. Саушкин, М. Н. Оценка релаксации остаточных напряжений в упрочнённой вращающейся лопатке при ползучести / М. Н. Саушкин, О. С. Афанасьева, Е. А. Просвиркина // Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2007. – № 1(14). – С. 62-70.

144. Саушкин, М. Н. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения / М. Н. Саушкин, В. П. Радченко, В. Ф. Павлов // ПМТФ. – 2011. – Т. 52, № 2. – С.173-182.

145. Саушкин, М. Н. Блок расчёта начального напряжённо-деформированного состояния конструкций в программном комплексе Strelax / М. Н. Саушкин, В. А. Смыслов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5(21). – С. 318–321.

146. Семкин, Г. В. Зависимость критической глубины нераспространяющейся трещины усталости от размеров поперечного сечения упрочненной детали / Г. В. Семкин, П. А. Семенов, А. П. Морозов // Международная молодежная научная конференция «XII Королёвские чтения». Самара: СГАУ. – 2013. – Том 1. – С. 118.

147. Серебряков, В. И. Формирование остаточных напряжений при единичном ударе / В. И. Серебряков // В сб.: Проблемы повышения качества, надёжности и долговечности деталей машин и инструментов. Брянск: Брянск. ин-т трансп. машиностр. – 1992. – С. 68-72.

148. Смыслов, В. А. Разработка методики и программного обеспечения для решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений / В. А. Смыслов, А. П. Морозов // Материали за IX международна научна практична конференция «Achievement of high school - 2013». Болгария. – 2013. – Том 44. Технологии. – С. 49-51.

149. Соснин, О. В. Энергетический вариант теории ползучести / О. В. Соснин, Б. В. Горев, А. Ф. Никитенко. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. – 95 с.

150. Сулима, А. М. Поверхностное слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шушлов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

151. Цейтлин, В. И. Релаксация остаточных напряжений в деталях турбины ГТД в процессе эксплуатации / В. И. Цейтлин, О. В. Колотникова // Проблемы прочности. – 1980. – № 3. – С. 6-11.

152. Чепа, П. А. Анализ процесса формирования остаточных напряжений при упрочнении деталей поверхностным деформированием / П. А. Чепа // Проблемы прочности. – 1980. – № 11. – С. 100-104.

153. Чернышев, Г. Н. Остаточные напряжения в деформируемых твёрдых телах / Г. Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев, И. И. Пономарёв. – М.: Физматлит, 1996. – 240 с.

154. Чирков, А. В. Оценка влияния упрочнения образцов из стали 20 на предел выносливости при опережающем поверхностном пластическом деформировании / А. В. Чирков, А. П. Михалкина, Г. В. Семкин, А. П. Морозов // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Современное техническое образование и транспортный комплекс России: состояние, проблемы и перспективы развития». Уфа. – 2013. – С. 262-263.

155. Шерменгор, Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред / Т. Д. Шерменгор. – М.: Наука, 1977. – 400 с.

156. Шершнева, М. В. Метод расчета ресурса стержневых конструкций на основе энергетического варианта ползучести и длительной прочности / М. В. Шершнева // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2012. – № 1(26). – С. 141-149.

157. Altenberger, I. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6-Al-4V at elevated temperatures up to 550 / I. Altenberger, R. K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, R. O. Ritchie // Int. J. Fatigue. – 2012. – vol. 44. – pp. 292-302.

158. Benedetti, M. Reverse bending fatigue of shot peened 7075-E651 aluminum alloy: the role of residual stress relaxation / M. Benedetti, V. Fontanari, P. Scardi // Int. J. Fatigue. – 2009. – no. 31. – P. 1225-1236.

159. Besserdich, G. Consequences of transformation plasticity on the development of residual stress and distortion during martensitic hardening of SAE4140 steel cylinders / G. Besserdich, B. Scholtes, H. Miiller, E. Mochrauch // Steel Res. – 1994. – Vol. 65, no. 1. – P. 41-46.

160. Betten, J. A. Net – stress analysis in creep mechanics / J. A. Betten // *Ing. Arch.* – 1982. – V.52. №6. – P. 405-419.
161. Boyle, J. T. Stress analysis for creep / J. T. Boyle, J. Spence – London: Butterworths, 1983. – 284 p.
162. Broberg, H. A probabilistic interpretation of creep rupture curves / H. Broberg // *Arch. Mech.* – 1973. – Vol. 25, no 2. – Pp. 871-878.
163. Broberg, H. Properties of a random creep process / H. Broberg, R. Westlung // *Int. J. Solids and Structures.* – 1982. – Vol. 18, no. 4. – Pp. 275-283.
164. Brockman, R. A. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening / Brockman R. A., W. R. Braisted, S. E. Olson, R. D. Tenaglia, A. H. Clauer, K. Langer, M. J. Shepard // *Int. J. Fatigue.* – 2012. – vol. 36, no. 1. – pp. 96-108.
165. Buchanan, D. J. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading / D. J. Buchanan, R. John // *Scripta Materialia.* – 2008. – no. 3. – P. 286-289.
166. Dai, K. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation / K. Dai, L. Shaw // *Int. J. Fatigue.* – 2008. – vol. 30. – no. 8. – pp. 1398-1408.
167. Evans, A. Relaxation of residual stress in shot peened Idimet 720Li under high temperature isothermal fatigue / A. Evans, S.-B. Kim, J. Shackleton // *Int. J. Fatigue.* – 2005. – Vol. 27, no. 10-12. – P. 1530-1534.
168. Foss, B. J. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000 / B. J. Foss, S. Gray, M. C. Hardy // *Acta Materialia.* 2013. – Vol. 61, no. 7. – P. 2548-2559.
169. James, M. N. Residual stresses and fatigue performance / M. N. James, D. J. Hughes, Z. Chen, H. Lombard, D. G. Hattingh, D. Asquith, J. R. Yates, P. J. Webster // *Engineering Failure Analysis.* – 2007. – vol. 14, no. 2. – pp. 384-395.
170. Khadraoui, M. Experimental investigations and modeling of relaxation behavior of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superal-

loys / M. Khadraoui, W. Cao, L. Castex // Mater. Sci. and Technol. – 1997. – Vol. 13, no. 4. – P. 360-367.

171. Kim, J.-C. Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel / J.-C. Kim, S.-K. Cheong, H. Noguchi // Int. J. Fatigue. – 2013. – Vol. 56. – P. 114-122.

172. Pavlov, V. F. Effect of Thermoexposition on Residual Stresses and Limiting Amplitude for Rolled Bolts Made of 16KhSN Steel / V. F. Pavlov, V. P. Radchenko, M. N. Saushkin // Russian Aeronautics. – 2015. – Vol. 58, No 1. – Pp. 129-132.

173. Pechersky, M. J. Determination of residual stresses by thermal relaxation and speckle correlation interferometry / M. J. Pechersky // Strain. – 2002. – Vol. 38, no. 4. – P. 141-149.

174. Radaeyv, Yu.N. Mathematical Description of Anisotropic Damage State in Continuum Damage Mechanics / Yu. N. Radaeyv, S. Murakami, K. Hayakawa // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. – 1994. – V60A. №580. – P.68-76.

175. Soady, K. A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening Part 1 - effect of shot peening on fatigue resistance / K. A. Soady // Materials Science and Technology (United Kingdom). – 2013. – Vol. 29, no. 6. – pp. 637-651.

176. Strelax // Свид. о регистрации программы для ЭВМ №2013619758 / Смыслов В.А., Саушкин М.Н.; правообладатель Смыслов В.А. - заявка №2013615774; заявл. 09.07.2013; зарегистр. 14.10.2013.

177. T-jump // Свид. о регистрации программы для ЭВМ №2014614005 / Смыслов В.А.; правообладатель Смыслов В.А. - заявка №2014611458; заявл. 25.02.2014; зарегистр. 14.04.2014.

178. Terres, M. A. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach / M. A. Terres, N. Laalai, H. Sidhom // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – pp. 741-748.

179. Wern, H. A new approach to Triaxial residual stress evaluation by the hole drilling method / H. Wern // *Strain*. – 1997. – Vol. 33, no. 4. – P. 121–125.

180. Wern, H. A new method to determine Triaxial non-uniform residual stresses from measurement using the hole drilling method / H. Wern, R. Gavelius, D. Schlafer // *Strain*. – 1997. – Vol. 33, no. 2. – P. 39–45.

181. Xie, L. Thermal relaxation of residual stresses in shot peened surface layer of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite at elevated temperatures / L. Xie, C. Jiang, V. Ji // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528, no. 21. – P. 6478–6489.

Приложение А

Акт о внедрении результатов работы в учебном процессе

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый проректор –
проректор по научной работе
Самарского государственного
технического университета
д.т.н., профессор

М.В. Ненашев



22.09.2017 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Морозова А.П. «Стохастические модели релаксации остаточных напряжений и кинетика микротвёрдости материала в поверхностно упрочнённых элементах конструкций в условиях ползучести», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, в учебном процессе Самарского государственного технического университета.

Комиссия в составе начальника учебного управления университета Е.А. Алонцевой, заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» В.П. Радченко и председателя методического совета инженерно-экономического факультета О.Ю. Ерёмичевой составила настоящий акт о том, что в учебном процессе Самарского государственного технического университета использованы следующие результаты кандидатской диссертации А.П. Морозова.

1. Основные результаты исследования кинетики остаточных напряжений и физико-механических параметров поверхностного слоя в процессе ползучести и многоциклового нагружения для поверхностно упрочнённых плоских и цилиндрических образцов используются в лекционном материале дисциплины «Математические основы механики поверхностного пластического упрочнения».

2. Стохастическая модель ползучести материала на основе теории неполной обратимости реологической деформации, методы численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностного упрочнённого полого цилиндра и идентификации параметров стохастической модели ползучести используются в лекционном материале дисциплины «Численные методы решения краевых задач механики деформируемых твёрдых тел» и «Реологические модели».

Начальник УУ СамГТУ

Зав. кафедрой ПМИИ

Председатель МС ИЭФ

Е.А. Алонцева

В.П. Радченко

О.Ю. Ерёмичева

Приложение Б

Акт о внедрении результатов работы на предприятии

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор

ПАО «Кузнецов»

Люсов О.А.

2017 г.



АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации

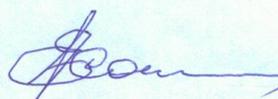
Морозова Андрея Павловича

«Стохастические модели релаксации остаточных напряжений и кинетика микротвёрдости материала в поверхностно упрочнённых элементах конструкций в условиях ползучести»

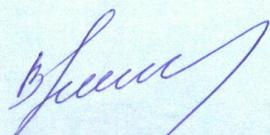
Мы, представители публичного акционерного общества «Кузнецов» – первый заместитель Генерального конструктора Кочеров Е.П. и ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) – заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Радченко В.П. и начальник управления научных исследований Давыдов А.Н. составили настоящий акт о том, что:

- 1) методика построения стохастической математической модели ползучести для одноосного и сложного напряженного состояния;
- 2) метод численного решения стохастической кривой задачи ползучести поверхностно упрочнённых цилиндрических изделий при осевом растяжении для статистических оценок полей остаточных напряжений;
- 3) результаты экспериментальных и теоретических исследований по влиянию режимов упрочнения, температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику остаточных напряжений, микроструктуру материала в упрочнённой зоне, параметры микротвёрдости и шероховатости плоских и цилиндрических образцов из сплавов В95, Д16Т, ЭИ698ВД и стали 20 внедрены в отделе прочности ОКБ ПАО «Кузнецов».

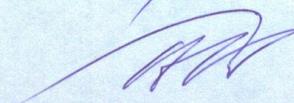
Первый заместитель
Генерального конструктора,
кандидат технических наук

 Кочеров Е.П.

Заведующий кафедрой «Прикладная
математика и информатика»
ФГБОУ ВО СамГТУ, д.ф.-м.н., профессор

 Радченко В.П.

Начальник управления
научных исследований
ФГБОУ ВО СамГТУ,
к.т.н., доцент

 Давыдов А.Н.