

На правах рукописи

Захарченко Кирилл Владимирович

**МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И СВЯЗАННЫХ
С НИМИ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
УСТАЛОСТИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 01.02.06

«Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете на кафедре «Проектирование технологических машин».

Научный
руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Капустин Владимир Иванович

Официальные
оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
директор Красноярского филиала Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института вычислительных технологий
Сибирского отделения Российской академии
наук (СКТБ “Наука” ИВТ СО РАН)
Москвичев Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет путей сообщения» (СГУПС)
Шабанов Александр Петрович

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики прочности
и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г.
Томск

Защита состоится «__»_____ 2018 г. в __:__ час. на заседании
диссертационного совета Д 003.054.02 при Институт гидродинамики им. М.А.
Лаврентьева СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГиЛ СО РАН и на
сайте организации <http://www.hydro.nsc.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

В.Д. Кургузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из наиболее значимых прочностных характеристик элементов авиационных конструкций и деталей машин является усталостная долговечность. Анализ показывает, что 80-90% преждевременных разрушений по современным оценкам связаны с процессами усталости. Для увеличения сопротивления усталостному разрушению наиболее ответственных деталей летательных аппаратов разрабатываются новые материалы, обладающие повышенной прочностью (алюминиевые сплавы: В95, В96, 1163, В-1461). Для оценки работоспособности элементов конструкций, выполненных из новых материалов, приходится выполнять целый комплекс разрушающих усталостных испытаний, как материалов, так и самих деталей из этих материалов, что сопровождается значительными временными и материальными затратами. Альтернативой длительным разрушающим испытаниям могут быть ускоренные и неразрушающие методы, в основе которых заложен объективный процесс деградации материала, и его характеристики, связанные с механическими явлениями при деформировании и с усталостью материала.

Требуется создать новые методы, обеспечивающие определение характеристик усталостного разрушения деталей и материалов без их разрушения и решить задачи, связанные с нахождением характеристик, описывающих процесс предразрушения материала в слабом месте детали, с точностью, достаточной для оценки долговечности при проектировании деталей и в условиях эксплуатационного нагружения.

Достоверность и оперативность прогноза ресурса детали – без её разрушения – это требования, которые можно выполнить, применив комплексные методы оценки усталостной долговечности, включающие в себя физические методы исследования. Физические методы в исследовании позволяют описать процесс деградации материала и являются основой комплексного подхода в описании процесса усталостного разрушения.

В работе, в качестве одного из важных экспериментальных средств, используют тепловизор, который позволяет определять температуру диссипативного разогрева в месте предразрушения детали с высокой точностью. Основанием выбора данного средства контроля связано не только с тем, что тепловизор позволяет осуществлять оперативный, быстрый и бесконтактный контроль температуры, но и выделить стадию неупругого деформирования и предельное состояние материала.

Актуальность применения дополнительных средств (исследование микроструктуры материала и фазового состава) обуславливается необходимостью всестороннего описания начальной стадии разрушения

материала, которая сопровождается явлениями самоорганизации и образованием диссипативных структур.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете в период 2012-2015 гг. в соответствии с планом научно-исследовательских работ НГТУ в рамках проектов ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Государственный контракт 02.740.11.0819). Часть результатов получена при выполнении исследований совместно с институтами ИНХ СО РАН и ИГиЛ СО РАН при выполнении проектов РФФИ № 10-08-00-220, 12-08-31466 мол_а, 15-01-07631 А, 16-08-00713 А, 16-08-00483 А, в том числе под руководством автора диссертационной работы гранты НГТУ № 023 – НСГ – 11, РФФИ № 14-08-31352 мол_а.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является разработка метода определения *предельного* напряженно-деформированного состояния материала по изменению деформированного состояния, по изменению температуры диссипативного разогрева и сопутствующим изменениям морфологии поверхности и фазового состава материала.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих **задач**:

1. Определить предельное НДС образца материала при периодическом нагружении, при котором появляется накопление необратимых изменений в главных компонентах тензора полных деформаций в конструкционных сплавах: Д16Т, 1163, В95, В-1461, Сталь 40Х, Х18Н10Т, 30ХГСНА. Изучить влияние модификации поверхностного слоя образцов материалов на деформационные характеристики при периодическом нагружении.
2. Определить предельное НДС образца материала при циклическом нагружении по возникновению диссипативного разогрева рабочей части. Сравнить предельные НДС, полученные деформационным способом и по разогреву.
3. Исследовать формирующуюся микроструктуру поверхностного слоя рабочей части образца материала в области предельного НДС, связанную с механическими явлениями, протекающими под действием циклического нагружения, методами микроскопии (лазерная профилометрия, оптическая и электронно-сканирующая микроскопия). Получить экспериментальные данные о влиянии периодического деформирования на структурно-фазовые характеристики материала.

Научная новизна.

1. Разработан метод исследования, позволяющий определить начало возникновения необратимых явлений при периодическом деформировании образцов путем измерения главных компонент тензора полных деформаций, диссипативного разогрева.

2. Построены новые диаграммы критических напряжений в координатах Хэя (Haigh) и Смита (Smith), которые характеризуют начало активизации диссипативных процессов и процесса разрушения материала. Диаграммы критических напряжений подобны диаграммам предельных напряжений усталости. Экспериментально установлено, что разрушение образцов при критических нагрузках происходит при напряжениях, соответствующих разрыву кривых усталости материалов, где наблюдается бимодальный закон распределения разрушений, и смена механизма деформирования, которые происходят для исследованных алюминиевых сплавов при числе циклов до разрушения в области 1×10^5 .

3. Разработан метод, позволяющий оценить вклад модификации поверхностного слоя в закономерности накопления необратимых деформаций в рабочей части гладкого образца материала.

4. Существенные отличия разработанного метода исследования закономерностей периодического деформирования и связанных с ними диссипативных процессов при усталости авиационных материалов от известных, заключается в том, что в нем объединены способы макро- и микроскопического анализа, позволяющие выявлять предельное НДС по возникновению диссипативных структур в месте предразрушения.

Научная и практическая значимость работы состоит в разработке и использовании нового метода исследования закономерностей периодического деформирования и связанных с ними процессов диссипации для ускоренного неразрушающего контроля сопротивления авиационных материалов и деталей машин. Использование нового метода исследования природы усталостного разрушения при испытаниях авиационных материалов значимо для ускоренной оценки влияния эксплуатационно-технологических факторов на сопротивление усталостному разрушению, а также в полезности для дальнейших исследований.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод определения предельного НДС (критических напряжений) по накоплению необратимой деформации, диссипативному разогреву и структурными изменениями.

2. Определение влияния состояния поверхностного слоя исследованных материалов на сопротивление деформированию при периодическом нагружении и связанные с ним процессы диссипации.

3. Результаты экспериментального исследования необратимых деформаций и их связь с диссипативным разогревом, структурным изменением материала при периодическом деформировании.

4. Диаграммы предельных НДС в координатах Хэя (Haigh) и Смита (Smith), полученные ускоренным неразрушающим способом, определяющие связь амплитуды и средней составляющей цикла напряжений с усталостью.

Личный вклад автора состоит в анализе литературных источников, в совместной с научным руководителем формировании цели и постановке задач исследования, разработке методов, формулировке выводов диссертации, написании статей по теме диссертации. Автор лично проводил экспериментальные исследования, представленные в работе, составлял программы обработки, обрабатывал и анализировал полученные экспериментальные результаты.

Достоверность экспериментальных исследований, обеспечивается методологией проведения эксперимента, устойчивой воспроизводимостью результатов, использованием поверенного метрологического оборудования и согласием полученных результатов с данными других авторов. Достоверность научных положений, результатов и выводов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается обоснованностью физических представлений, корректностью подготовки и проведения эксперимента, согласием с результатами других авторов.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены и обсуждены на 1 зарубежной и 13 научных конференциях, проходивших на территории РФ Всероссийского и международного уровня. Среди них: X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2011), Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, ИФПМ СО РАН, 2011), II и III Всероссийские конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (Новосибирск, ИГиЛ СО РАН, 2011, 2014), Excellent Graduate Schools 2012 Annual Meeting in conjunction with Japan-Russia Workshop on Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure, (Sendai, Japan, Tohoku University, 2013), Международная конференция «New Trends in Fatigue and Fracture» NT2F13 (Москва, ИМАШ РАН, 2013), Международная конференция «Иерархически организованные системы живой и неживой природы» (Томск, ИФПМ СО РАН, 2013), Всероссийская научная конференция с международным участием «Перспективные материалы в технике и строительстве» ПМТС-2013 (Томск, ТГАСУ, 2013), V и VI Международные конференции «Деформация и разрушение материалов и

наноматериалов» DFMN-2013 (DFMN-2015) (Москва, ИМЕТ РАН, 2013, 2015), Научный семинар с международным участием «Структура и свойства металлов при различных энергетических воздействиях и технологических обработках» ССМЭВТО-2014 (Томск, ТГАСУ, 2014), 11 Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015), Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (Новосибирск, 2017).

Публикации по теме диссертации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 25 научных публикациях, в том числе в 8 статьях российских журналов из перечня ВАК, 4 статьях в рецензируемых зарубежных журналах и в 13 в периодических сборниках, трудах и тезисах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка используемой литературы (200 наименований), изложена на 185 страницах и содержит 70 рисунков, 19 таблиц и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы. Изложены методологические основы диссертационного исследования, раскрыта их научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Первая глава. Состояние проблемы и методы определения характеристик усталости материалов

Данная глава диссертации дает оценку состояния проблемы и представляет собой обзор отечественной и зарубежной литературы по исследованию природы усталости в металлических материалах и элементах конструкций. Приводится краткий обзор исторического развития знаний об усталости металлов и применяемых методов для определения усталостных характеристик. Проанализированы основные расчетно-экспериментальные методы исследования закономерности образования и развития неупругого деформирования в процессе накопления повреждений: деформационные, силовые, энергетические и термодинамические. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что ни один из методов не предлагает универсального критерия усталостного разрушения.

Рассмотрено современное состояние неразрушающих методов ускоренной оценки предела выносливости, основанных на изменении

внутренней структуры материала. Приведенный обзор показывает необходимость комплексного изучения физико-механических свойств материала в процессе периодического деформирования. Представлены и проанализированы особенности механических моделей материалов при неупругом периодическом деформировании. На основе анализа собранных данных показана актуальность и необходимость разработки новых и усовершенствования существующих методов неразрушающего контроля, основываясь не только на анализе чисто механических явлений при деформировании, но и на анализе явлений немеханической природы – предвестников усталостного разрушения.

Вторая глава. Материалы, образцы, оборудование и метод исследования.

Раздел 2.1 посвящен выбору материалов образцов. Материалы для исследования подобраны из числа наиболее востребованных для изготовления наиболее ответственных узлов в авиастроении. Это алюминиевые, высокопрочные сплавы: В95очТ2 (7175), В-1461, 1163, Д16Т; стали высоколегированные, коррозионностойкие Х18Н9Т, 30ХГСНА и стали хромистые - 40Х.

В разделе 2.2 описывается специальная технология подготовки стандартных образцов, объединяющих в себе возможности для исследований характеристик напряженно-деформированного состояния, структуры и морфологии поверхности и температуры диссипативного разогрева.

Раздел 2.3. Поверхностный слой образцов исследованных сплавов был представлена пятью вариантами: в состоянии поставки (плакированный), после электрохимического травления, после технологического процесса, связанного с изменением поверхностного слоя: 1) поверхностное пластическое деформирование – ППД, 2) микродуговое оксидирование – МДО, 3) холодное динамическое напыление – ХДН.

Геометрия образца позволяла выполнять прямые измерения трех компонент тензора деформаций.

В разделе 2.4 описывается оборудование. Нагружение образцов при определении характеристик деформирования осуществлялось на универсальной сервогидравлической испытательной машине Instron 8801, которая позволяла деформировать образцы без кинематических ограничений, и обеспечивала мягкий режим нагружений. Для измерения приращения компонент тензора полных деформаций «in-situ» использовались штатные экстензометры: № 2620-601 «Dynamic Extensometer», «Transverse/Diametral Extensometer» № W-E-404-F (не ниже ISO 9513 класс 0.5). Испытания на

усталость проводились в диапазоне частот от 0,5 до 10 Гц и коэффициентами асимметрии цикла $R = \infty$; $R = -1$; $R = 0$ и $0 < R < 1$.

Для определения момента возникновения предельного НДС и отслеживания момента возникновения диссипативного разогрева образца применялся сертифицированный тепловизор ТКВр-ИФП «СВИТ» производство ИФП СО РАН. Температурная чувствительность 0,028 °С.

В работе исследовалось изменение состояния поверхности образцов при помощи оптического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer A1m», (Германия), комплекса по определению топографии поверхности «Zygo New View 7300», (США). Морфологию поверхности, элементного состава и кристаллической структуры образцов исследовали при помощи сканирующего электронного микроскопа «Hitachi S-3400N».

В разделе 2.5 рассмотрен используемый новый метод экспериментального исследования материалов, позволяющий определить стадии необратимого деформирования материала, включающий в себя ступенчатое нагружение, выдержку на каждой ступени в течение времени, достаточном для обнаружения стадии неупругого деформирования; одновременные измерения компонент тензора полных деформаций и мгновенной температуры, состояния поверхностного слоя рабочей части образца или места предразрушения детали при напряжениях превышающих и ниже предельного НДС.

Истинные деформации образца определялись по формулам 1:

$$\varepsilon_x = \int_{l_{0x}}^{l_x} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_x}{l_{0x}}; \varepsilon_y = \int_{h_{0y}}^{h_y} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_y}{h_{0y}}; \varepsilon_z = \int_{b_{0z}}^{b_z} \frac{db}{b} = \ln \frac{b_z}{b_{0z}}; (1)$$

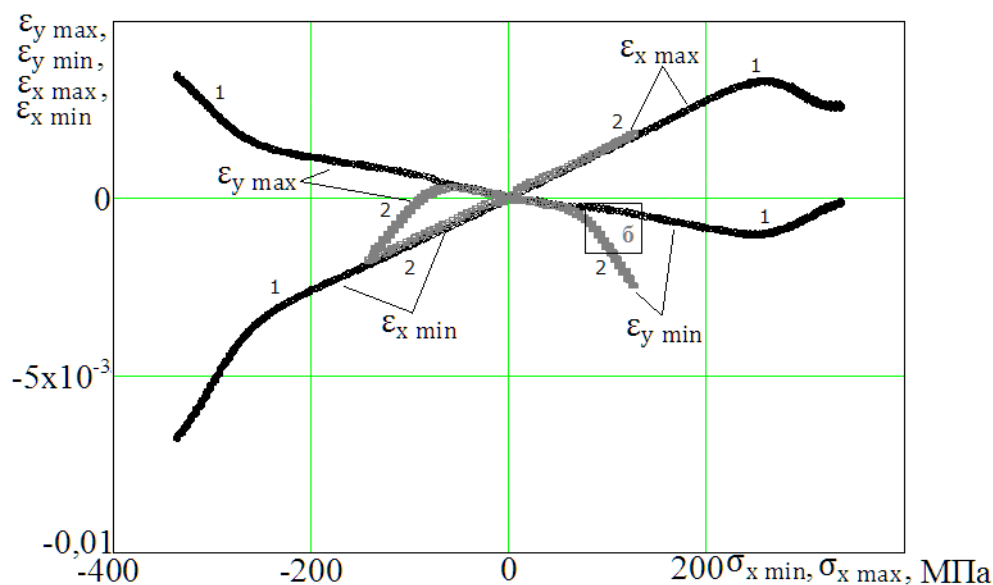
Кроме этого, так как в данной работе при изучении процесса деформирования не использовалась гипотеза о постоянстве объема, оценивалась гидростатическая составляющая тензора полных деформаций. Изменение объема связывалось с фазовыми превращениями в материале после деформирования.

В третьей главе представлены результаты экспериментального определения критического напряжения (предельного напряженно-деформированного состояния образца материала) в процессе периодического нагружения образца со ступенчато увеличивающейся амплитудой, при котором появляются необратимые деформации.

Изучено влияние состояния поверхностного слоя на закономерности деформирования гетерогенных образцов.

Получены диаграммы деформирования гетерогенных образцов материалов с разным поверхностным слоем, позволяющие определить напряжение, при котором активизируются необратимые явления и связанные с ними диссипативные процессы. При исследовании деформированного состояния образцов с поверхностным слоем полагали, что полные деформации образца определяются суммарным вкладом деформации поверхностного слоя и подложки. Для оценки влияния поверхностного слоя последовательно удаляли слои материала и исследовали деформированное состояние образцов.

На рис. 1 в координатах: $\epsilon_{x \max}$, $\epsilon_{y \max}$, $\epsilon_{x \min}$, $\epsilon_{y \min}$ от $\sigma_{x \max}$, $\sigma_{x \min}$ представлены типичные диаграммы деформирования, получаемые по разработанной методике для образцов сплава Д16Т с плакированным слоем «2» и без плакировки «1» при симметричном цикле напряжений. Здесь: $\epsilon_{x \max}$ и $\epsilon_{y \min}$ продольная и поперечная деформации соответственно, при максимальном напряжении в цикле $\sigma_{x \max}$; $\epsilon_{x \min}$ и $\epsilon_{y \max}$ продольная и поперечная деформации соответственно, при минимальном напряжении в цикле $\sigma_{x \min}$.



А

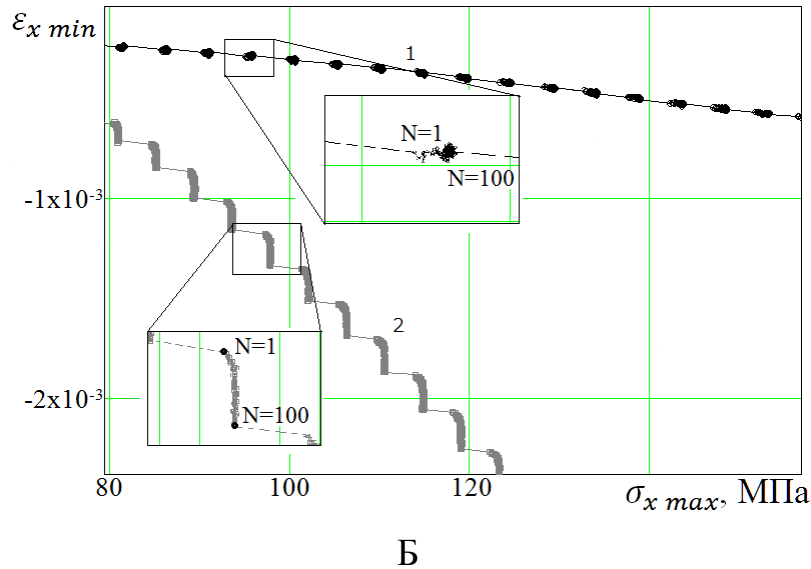


Рис. 1. Влияние плакирующего слоя (А). Фрагменты (Б) диаграмм: в области малых упругопластических деформаций

Экспериментально показано, что при деформировании образцов из сплава Д16АТ возникает два нелинейных эффекта: при напряжении 80 МПа (у образцов с плакирующим слоем «2») и 250 МПа (образцы без плакировки). Плакирующий слой отрицательно влияет на сопротивление деформированию и значительно уменьшает усталостную долговечность сплава (в 2 раза и более).

Данные о кинетике микродеформаций (рис. 2) образца алюминиевого сплава Д16АТ после электрохимической полировки, показывают, что после периодического нагружения ($\sigma_a = 149,5$ МПа, $N=11200$ циклов) шероховатость поверхности рабочей части (R_a) образца увеличилась в 2,1 раза.

Возникновение необратимого деформирования (нагружение за предельное напряжение) при периодическом нагружении приводит к возникновению поверхностного микрорельефа на поверхности рабочей части образца, что в данной работе связывалось с возникновением самоорганизующихся диссипативных структур.

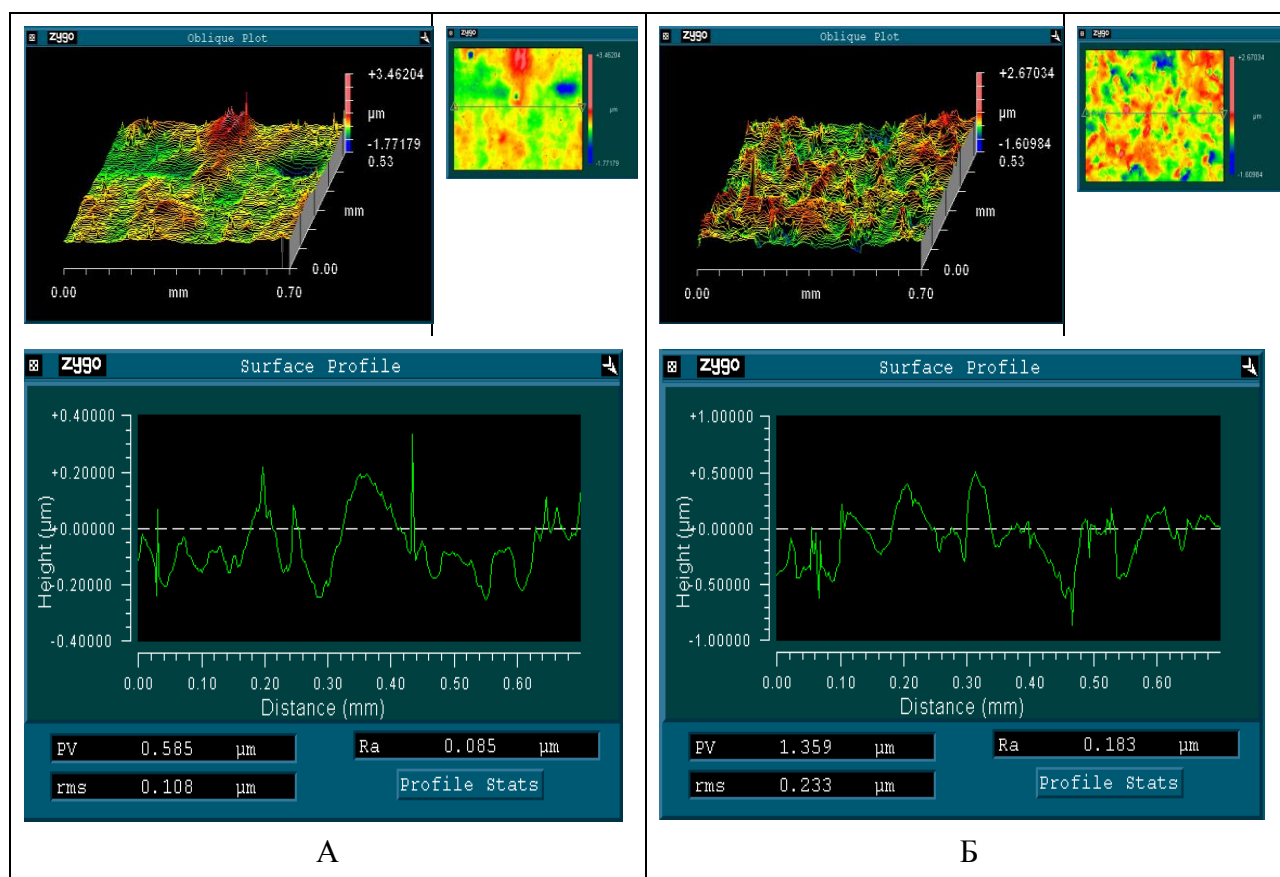


Рис. 2. Кинетика микродеформирования материалов. А) исходный материал Д16АТ, Ra 0,085мкм; Б) Д16АТ после деформирования Ra 0,183 мкм

На рис. 3 представлен типичный элемент такой самоорганизующейся диссипативной структуры образца Д16Т.

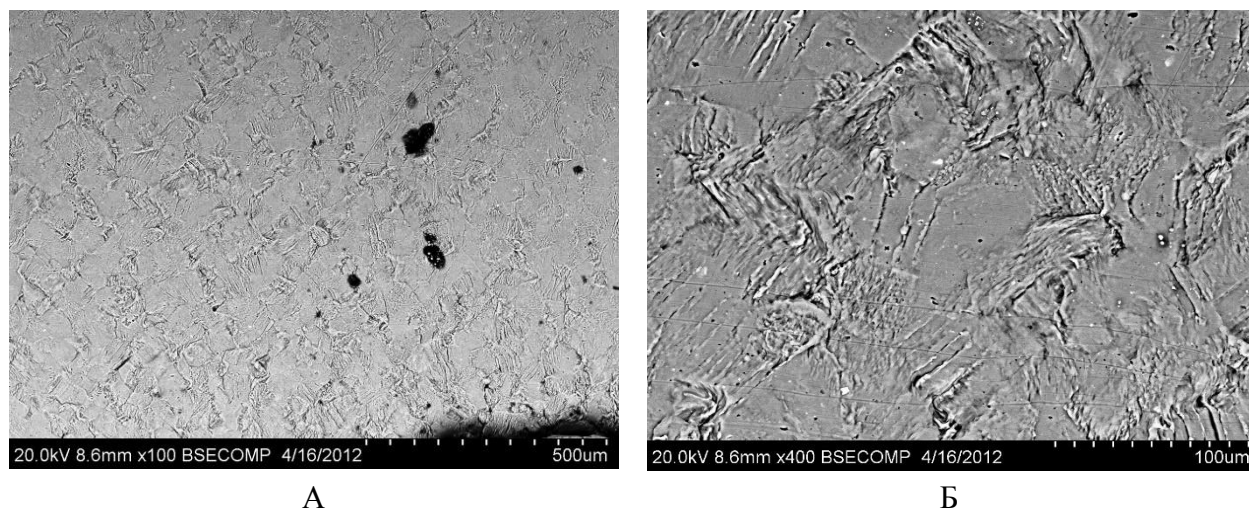


Рис. 3. Элемент структуры (Б) поверхностного микрорельефа (А) после деформирования

Экспериментально показано, что технологические факторы (плакирование, поверхностно-пластическое деформирование (ППД), микродуговое оксидирование поверхности (МДО), холодное динамическое напыление (ХДН), обработка металла резанием) модифицируют поверхность образца, оказывая влияние на деформационные характеристики сплавов при периодическом нагружении.

Так, например, на рис. 4 представлено влияние толщины упрочненного поверхностного слоя ППД на деформационные характеристики образца.

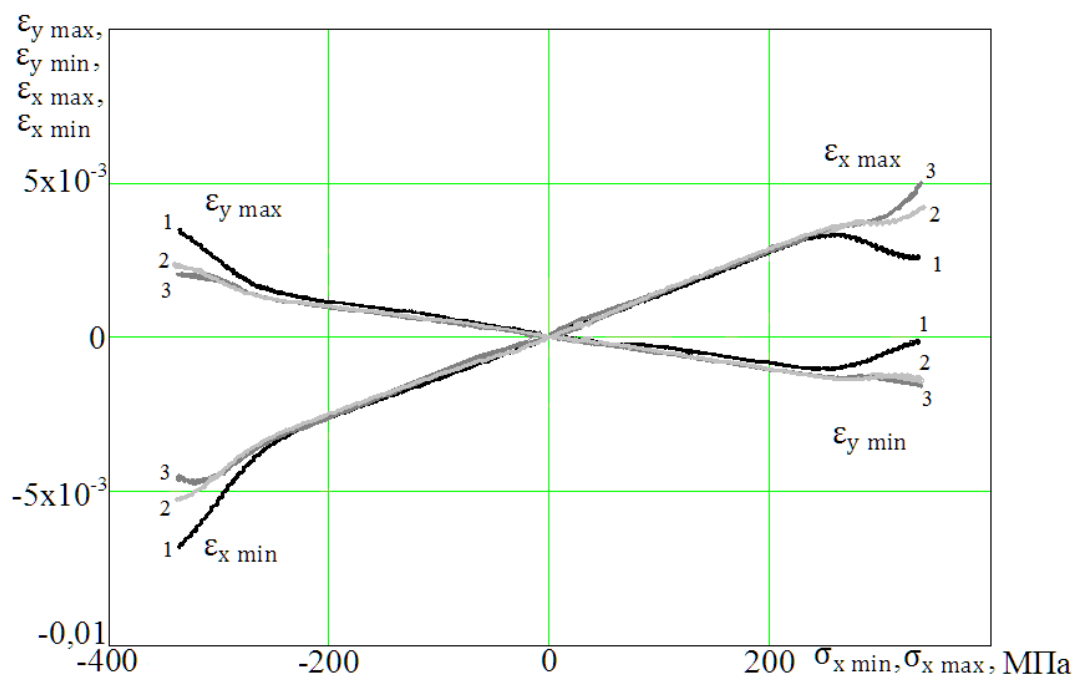


Рис. 4. Влияние ППД на закономерности деформирования периодическом нагружении

Данные опытов, представленные на рис. 4, свидетельствуют, что диаграмма деформирования «2» (образец с частично удаленным поверхностным слоем ≈ 400 мкм) занимает промежуточное расположение между диаграммами «1» и «3» — образца без плакировки (после травления) и упрочненного соответственно.

На рис. 5 цифрами «1» и «2» обозначены диаграммы деформирования образцов после травления и с покрытием соответственно. На рис. 5 показано влияние МДО, позволяющее повысить сопротивление деформированию образца на 20%.

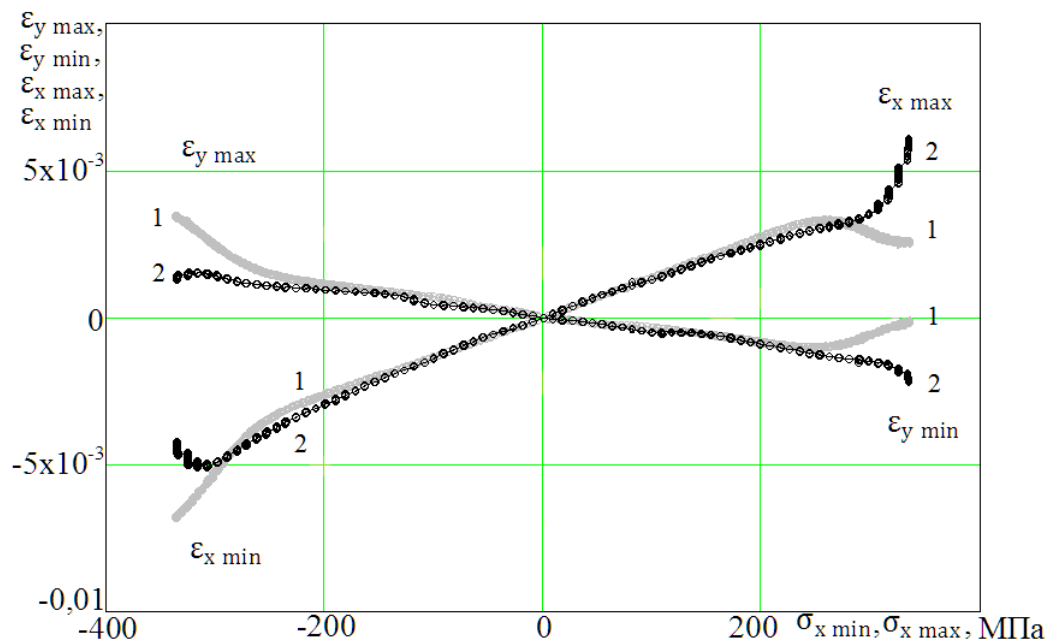


Рис. 5. Влияние микродугового оксидирования на закономерности деформирования периодическом нагружении

На рис. 6 показано влияние ХДН, позволяющее создать покрытие, которое не ухудшает деформационные характеристики сплава Д16Т по сравнению с плакирующим слоем.

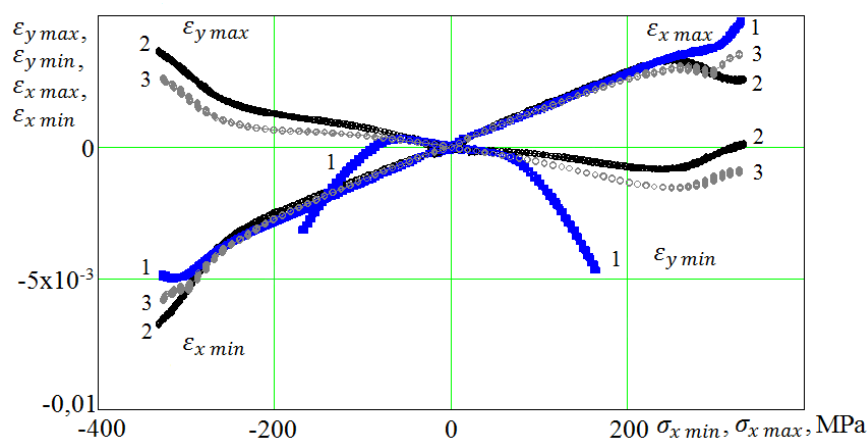


Рис. 6. Влияние технологии ХДН на закономерности деформирования при периодическом нагружении

На рис. 6 цифрами «2» и «3» обозначены диаграммы деформирования образцов после травления и с покрытием методом ХДН соответственно. Образец с плакированным слоем обозначен цифрой «1». Образец с покрытием методом ХДН «3», имеет идентичные характеристики деформирования, что и образец без покрытия «2».

Получена оценка влияния термической обработки на деформационные характеристики образцов стали 40Х.

На рис. 7 обозначены цифрами «1» и «2» диаграммы, полученные при деформировании образцов: сталь 40Х (отжиг 870 °С, охлаждение с печью) и сталь 40Х (закалка 860 °С выдержка 20 минут, масло, отпуск 150 °С 1 час) соответственно. Из сравнения диаграмм «1» и «2» (рис. 7) можно констатировать следующее: у закаленных образцов (диаграммы «2») объемная деформация увеличивается, т.е. выражен процесс разрыхления материала; а у образцов после отжига 1 рода (диаграммы «1»), с более выраженными пластическими свойствами, объемная деформация уменьшается.

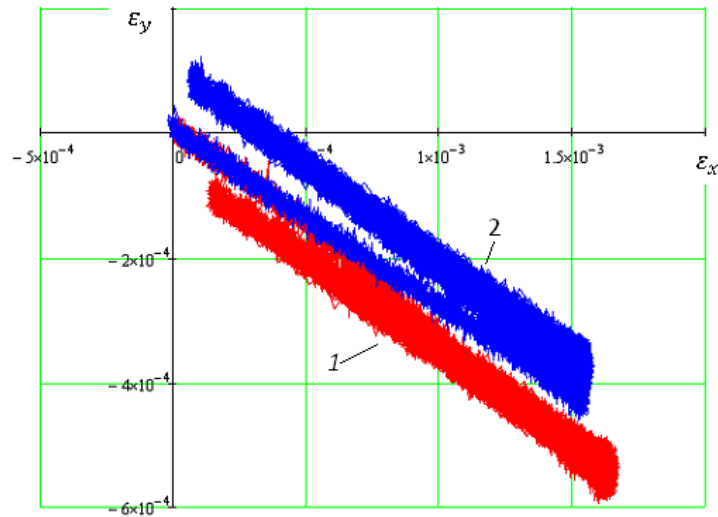


Рис. 7. Диаграммы деформирования образцов Ст40Х; 1 – отжиг, 2 – закалка

Как видно, образцы из стали 40Х после отжига обнаруживают тенденцию к уменьшению, а после закалки (сталь 40Х) – к увеличению объема рабочей части образца.

Основные выводы по главе:

- Экспериментально показано, что в предлагаемом методе могут быть определены напряжения при которых активизируются процессы необратимого деформирования в материале образца.
- Модификация поверхностного слоя позволяет изменить закономерность накопления деформаций в образце, увеличивать или уменьшать предельные напряжения при которых активизируются необратимые процессы в материале.

- Изменение максимального напряжения цикла, при котором активизируется процесс неупругого деформирования, соответствует изменению предела выносливости материала.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена изучению процесса диссипативного разогрева материала при периодическом деформировании и определению условий возникновения предельного состояния образца.

На образцах, изготовленных из аустенитной стали X18H10T, была выполнена программа нагружения, описанная в методе исследования и включающая в себя одновременное измерение компонент тензора деформаций и температуры диссипативного разогрева. Исследование образца выполнялось на фиксированных частотах нагружения из диапазона от 0,1 до 10 Гц. На рис. 8 представлены зависимости продольных компонент тензора деформаций (ε_x) «1» и относительное изменение температуры (Т) «2» от времени t . Диаграммы, представленные на рис. 8, показывают возникновение диссипативного разогрева одновременно с изменением деформаций.

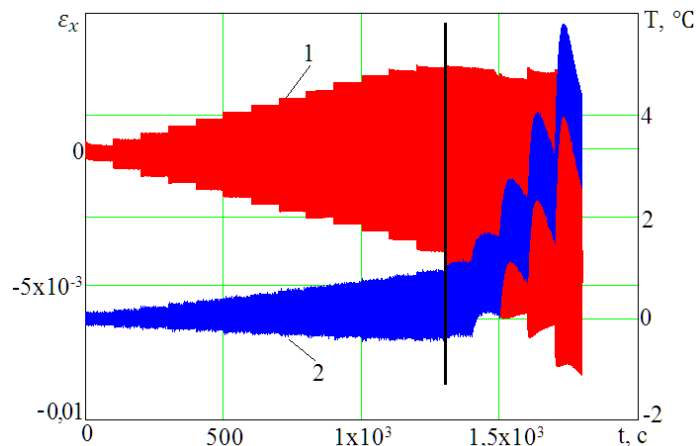


Рис. 8. Характеристики деформирования и температурных полей образца X18H10T

Сопоставление диаграмм деформирования и относительного изменения температуры при периодическом нагружении (рис. 8) позволяет установить факт, что предельное НДС можно обнаружить не только по изменению компонент тензора полных деформаций, но и по диссипативному разогреву образца бесконтактным способом. Анализ зависимости изменения температуры от напряжения указывает на существование двух стадий деформирования: упругой и неупругой.

Исследование характеристик деформирования и температурных полей образца в более широком диапазоне изменения максимальных номинальных

напряжений (до предела текучести) позволяет выделить три области деформирования материала. Области: 1 – упругое деформирование; 2 – неупругое — связанное с образованием диссипативных структур, описанных выше; 3 – неупругое — обусловленное началом процесса течения материала, связанного с кооперативным движением элементов микроструктуры.

Таким образом, разработанный способ может быть использован для установления предельного напряжения материала образца при периодическом нагружении — напряжения, при котором происходит изменение физических характеристик состояния (температура, деформация), которые фиксируются «in-situ».

Если для изучения закономерностей напряженного состояния и прочности материала изменять характеристики, например, коэффициент асимметрии цикла напряжения, то можно получить «in-situ» данные о предельном НДС материала для каждого коэффициента асимметрии.

Алгоритм определения предельного напряжения и результаты апробации этого способа алгоритм на сплаве Д16Т представлены на рис 9.

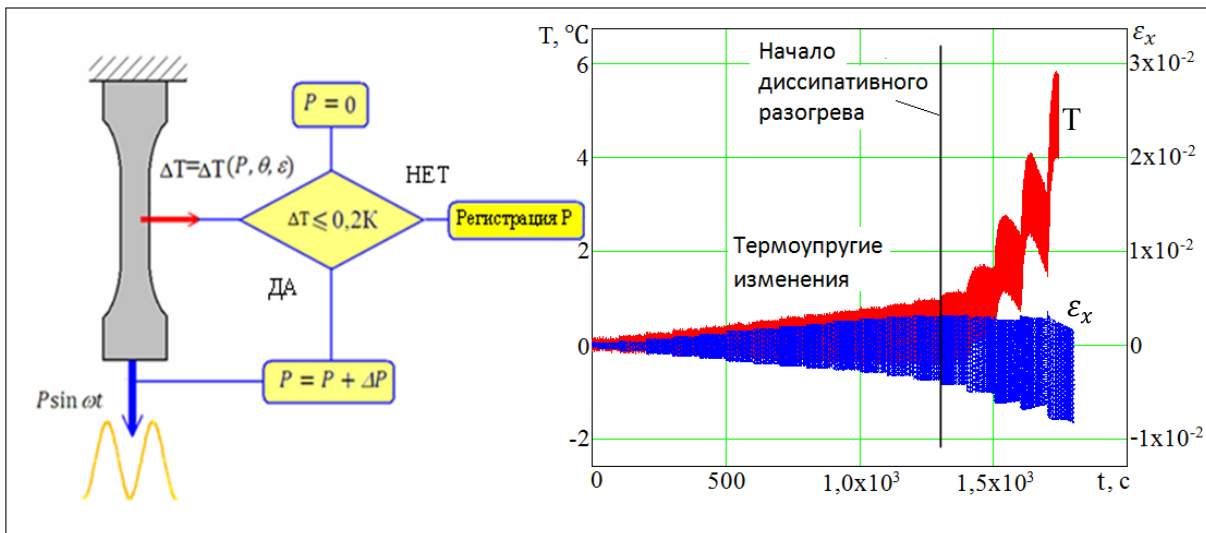


Рис. 9. Алгоритм определения предельного напряжения по диссипативному разогреву и изменению деформации

По представленному алгоритму на рис. 9 для сплава Д16Т были определены критические напряжения для коэффициентов асимметрии циклов в интервале $R \in [-1; 1)$ и построена диаграмма критических напряжений (рис. 10) в координатах, принятых при построении диаграмм предельных напряжений Смита (Smith).

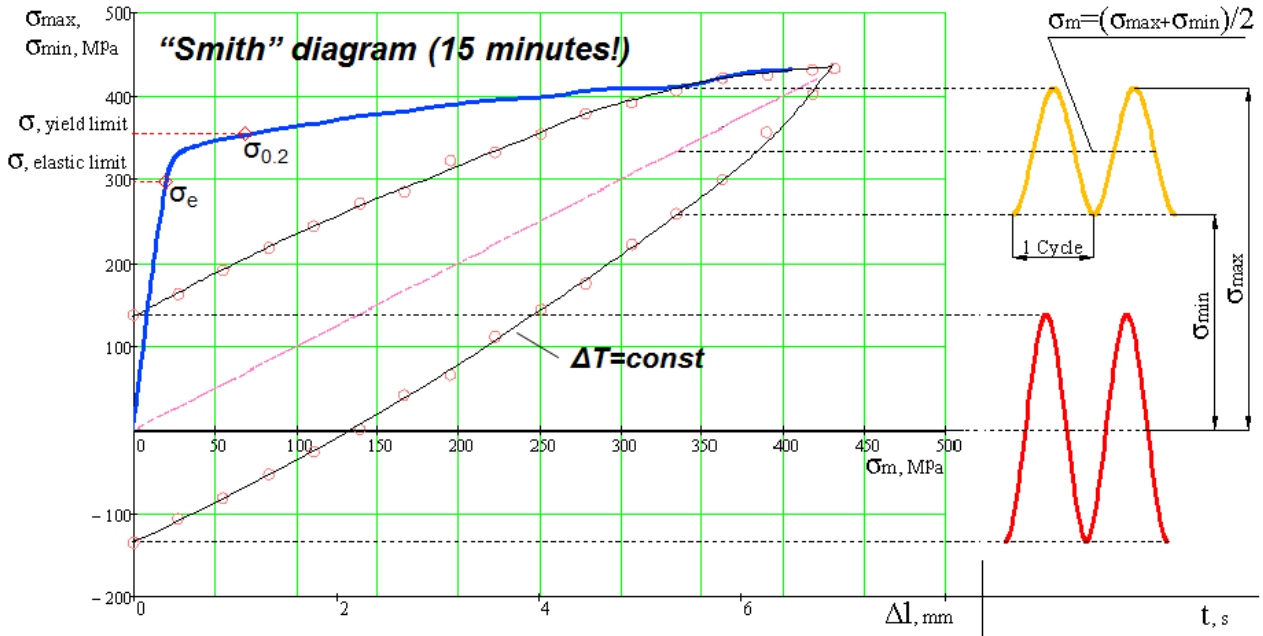


Рис. 10. Диаграмма деформирования при растяжении и критические напряжения образцов из Д16Т

Анализ зависимостей критических напряжений от среднего напряжения, полученных в широком диапазоне значений коэффициента асимметрии цикла, позволяет выявлять области, в которых материал сопротивляется периодическому нагружению без существенного изменения упругих свойств; например, для сплава Д16Т (рис. 10) это область $R \in (0; 1)$.

Для ответа на вопрос о том, как соотносятся пределы выносливости σ_R (диаграммы усталости Смита) с построенными диаграммами предельных напряжений σ'_R , проводилось сопоставление пределов выносливости и предельных напряжений, для разных коэффициентов асимметрии. Из сопоставления пределов выносливости σ_R с предельными напряжениями σ'_R видно, что метод даёт консервативную оценку предела выносливости материала, т.е. $\sigma_R \leq \sigma'_R$. Экспериментально установлено, что разрушение образцов происходит при напряжениях, соответствующих разрыву кривых усталости материалов, где наблюдается бимодальный закон распределения разрушения образцов, и смена механизма деформирования.

Таким образом, диаграммы, полученные по диссипативному разогреву, отличаются от диаграмм предельных амплитуд напряжений, широко используемых в инженерной практике, тем, что точки, принадлежащие диаграмме критических напряжений, соответствуют началу активизации диссипативных процессов и разрушения материала. Вопрос о дальнейшем развитии разрушения остается за пределом данного исследования. Точки,

лежащие внутри диаграммы, соответствуют обратимым процессам деформирования, а точки вне диаграмм - процессам диссипативным. Точки, принадлежащие диаграммам предельных напряжений усталости, соответствуют одинаковой циклической долговечности.

Разработан метод ускоренного определения характеристик сопротивления усталостному разрушению материалов деталей машин при асимметричных циклических нагружениях.

В заключение данной главы отметим важное свойство данного метода для практики. Диаграмму критических напряжений материала можно получить за малый промежуток времени (до 15 минут). Для того, чтобы получить диаграмму предельных напряжений усталости с такой же степенью подробности необходимы годы трудоемких испытаний на усталость.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе выполнено экспериментальное исследование закономерностей периодического деформирования и связанных с ними диссипативных процессов при усталости авиационных материалов. Разработан метод, позволяющий исследовать процессы неупругого деформирования при периодическом нагружении в области экстремальных напряжений цикла и определять предельные напряжения цикла, при которых активизируются процесс деградации материала, сопровождающийся диссипацией.

Основные результаты работы.

1. Разработан новый метод определения предельного НДС образца материала при циклическом нагружении по возникновению диссипативного разогрева рабочей части, позволяющий определить начало процесса диссипации при периодическом деформировании со ступенчато увеличивающейся амплитудой нагрузки.

2. Для сплавов: Д16Т, ЛС59, 30ХГСА, 40Х2Н4МА, 18ХН4МА экспериментально получены диаграммы предельных НДС в координатах Хэя (Haigh) и Смита (Smith) определяющие влияние средней составляющей на амплитуду цикла напряжений.

3. Разработан новый метод исследования деформированного состояния образца, позволяющий определить предельное НДС и начало процесса необратимого деформирования при периодическом нагружении со ступенчато увеличивающейся амплитудой по измерению экстремальных значений главных компонент тензора полных деформаций.

Апробация метода выполнена на гетерогенных образцах с модифицированным поверхностным слоем (плакирование, поверхностно-пластическое деформирование (ППД), микродуговое оксидирование

поверхности (МДО), холодное динамическое напыление (ХДН), обработка металла резанием), позволившая определить вышеуказанных технологических факторов на сопротивление усталостному разрушению материала Д16Т. Получен акт внедрения.

Для сплава В95 и В-1461 определены критические напряжения для назначения нагрузки при усталостных испытаниях. Получен акт внедрения.

4. Экспериментально показано, что на исследованных алюминиевых сплавах и сталях диссипативный разогрев обусловлен необратимым деформированием и возникновением поверхностного микрорельефа.

Основные публикации по теме диссертации

1. Капустин В.И., Гилета В.П., Захарченко К.В. Экспериментальное изучение закономерностей деформирования алюминиевых сплавов при регулярных нагружениях // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. №4 (53). – С. 40-43.
2. Капустин В.И., Гилета В.П., Захарченко К.В., Попелюх А.И. Исследование закономерностей периодического деформирования металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. Т. 78, №12. – С. 50-55.
3. Захарченко К. В., Капустин В. И., Ларичкин А. Ю. О влиянии керамического покрытия на деформационные характеристики алюминиевого сплава Д16АТ // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2014. № 3 (64). – С. 37-44.
4. Захарченко К. В., Капустин В. И. Влияние поверхностных слоев образцов на деформационные характеристики сплава Д16АТ // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. Т. 81, № 7. – С. 51-56.
5. Ларичкин А.Ю., Захарченко К.В., Горев Б.В., Капустин В.И. Физическое моделирование технологического процесса формообразования элементов конструкций из алюминиевого сплава В95 в условиях ползучести // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. №1 (70). – С. 6-15.
6. Ларичкин А.Ю., Горев Б.В., Захарченко К.В., Капустин В.И. Влияние технологического процесса формообразования на усталостную долговечность образцов из сплава В95очТ2 (7475) // Технология машиностроения. – 2017. №3. – С. 5-9.
7. Захарченко К.В., Зубков В.П., Капустин В.И., Максимовский Е.А., Таланин А.В. Анализ влияния технологий нанесения покрытий на деформационные характеристики образца при периодическом нагружении // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. Т. 14, №6 (162). – С. 243-246.