

ЗАПОРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Яценко Виктор Кузьмич

УДК 539.4:621.785,5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Специальность: 05.02.01 -- материаловедение в машиностроении

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Запорожье, 1996г.

Диссертация есть рукопись.

Работа выполнена в Запорожском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Ф.М. Муравченко

доктор технических наук Б.А. Грязнов

доктор технических наук, профессор В.В. Лунев

Ведущая организация: АО "Мотор-Сич".

Защита состоится 22 сентября 1996 г. в 15 час. на заседании специализированного ученого совета при Запорожском государственном техническом университете (330063, Запорожье, ул. Жуковского, 64).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета.

Автореферат разослан 12 сентября 1996 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00759942 (-)

Ученый секретарь
специализированного
ученого совета,
доктор технических наук,
профессор

Волчок И.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. В связи с непрерывным ростом требований к надежности и долговечности машин, особенно газотурбинных двигателей (ГТД), с ужесточением условий их работы и режимов эксплуатационной нагруженности, исследования, направленные на повышение и прогнозирование несущей способности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, остаются весьма актуальными.

Решение этой проблемы требует изучения эксплуатационной нагруженности деталей, анализа причин отказов в процессе эксплуатации, закономерностей влияния свойств поверхностного слоя на прочностные характеристики, а также создания новых упрочняющих технологий и оборудования.

Несущая способность наиболее нагруженных деталей ГТД в значительной мере определяется состоянием поверхностного слоя, который формируется в процессе механической обработки и, в основном, регулируется поверхностным пластическим деформированием (ППД). На стадии проектирования и внедрения технологического процесса выбор оптимальных режимов и прогнозирование эффективности упрочнения деталей является сложной задачей из-за большого числа эксплуатационных, конструктивных и технологических факторов, влияющих на их несущую способность.

В связи с этим, технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД рассматривалось автором с учетом влияния механических характеристик и структуры материалов, свойств поверхностного слоя, концентрации напряжений, масштабного фактора и условий работы с применением теории подобия и анализа размерностей.

Цель работы. Разработка математических моделей для оптимизации режимов поверхностного деформационного упрочнения при решении крупной народнохозяйственной задачи – обеспечения заданного ресурса энергетических установок на базе создания новых технологий и оборудования для их реализации.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Научная новизна работы. Впервые проведены комплексные систематизированные исследования по оценке влияния конструктивных и технологических факторов на формирование свойств поверхностного слоя наиболее нагруженных деталей (валов, дисков и лопаток) газотурбинных двигателей и их испытания на усталостную и ударную прочность при моделировании условий эксплуатации.

Установлены закономерности распределения остаточных напряжений в тонкостенных валах и дисках ГТД ($h = 3 \text{ мм}$), подвергнутых поверхностному деформационному упрочнению. Показано, что уровень и характер распределения остаточных сжимающих напряжений, в основном, определяются соотношением пластически- и упругодеформированных слоев металла; отношение глубины наклепанного слоя к толщине стенки детали не должно превышать $(h_n/h) < 0,1$.

Впервые с помощью анализа размерностей получено математическое описание процесса поверхностного пластического деформирования и разработана программа для расчета на ЭВМ безразмерных критериев подобия, учитывающих комплексное влияние повышенных температур, режимов упрочнения, механических характеристик материалов, концентрации напряжений и масштабного фактора на сопротивление усталости деталей энергетических установок.

Созданы математические модели коэффициентов упрочнения β^y ($\beta^y = \sigma_{-1}^y / \sigma_{-1}$) алмазным выглаживанием, обкаткой роликами и обработкой шариками в ультразвуковом поле, позволяющие управлять формированием свойств поверхностного слоя, оптимизировать режимы и прогнозировать повышение параметров выносливости натуральных деталей.

Разработана методика оценки влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на ударную прочность лопаток ГТД с моделированием нагрузок, возникающих при их соударении с инородным телом.

Показано, что поверхностное деформационное упрочнение виброгалтовкой практически полностью восстанавливает несущую способность

стальных лопаток ГТД после длительной наработки и значительно уменьшает рассеяние пределов выносливости, что свидетельствует о стабилизации свойств поверхностного слоя.

Установлено, что ультразвуковое упрочнение, выполняемое после обработки в псевдосжиженном слое абразива (ПСА), межпазовых выступов дисков компрессора из жаропрочных сплавов сопровождается благоприятным изменением элементного состава тонкого поверхностного слоя — уменьшением процентного содержания внедренных в металл абразивных частиц за счет механического разрушения шариками и пластической деформации, выдавливающих их на поверхность.

Получена математическая зависимость, позволяющая прогнозировать изменение B_{-1} при наличии вибрационных нагрузок с учетом механических характеристик материалов, концентрации напряжений и параметров эксплуатационного спектра нагружения деталей ГТД.

Получена зависимость для определения коэффициента K , характеризующего "живучесть" материалов при перегрузках по значениям долговечностей разрушенных образцов, испытанных по методу ступенчатого изменения нагрузок "вверх-вниз".

Практическую ценность работы представляет использование полученных результатов применительно к повышению несущей способности деталей энергетических установок.

Разработанная методика исследования тангенциальных остаточных напряжений на частях колец использована для подтверждения оптимальных режимов деформационного упрочнения полых валов ГТД.

Разработанная методика оценки ударной прочности лопаток компрессора с моделированием условий соударения с инородным телом применена для обоснованного назначения режимов поверхностного пластического деформирования, что значительно повышает вероятность прохождения контрольно-сдаточных испытаний ГТД.

Полученные закономерности формирования остаточных напряжений в тонкостенных валах и дисках ГТД использованы для выбора режимов де-

формационного упрочнения, обеспечивающих равнопрочность наружной и внутренней поверхностей.

Математические модели коэффициентов упрочнения применены для оптимизации режимов ППД валов, дисков и лопаток на стадии внедрения технологического процесса и прогнозирования пределов выносливости. Разработаны программы для ЭВМ и нормативно-технические документы.

Полученные закономерности влияния свойств поверхностного слоя на ударную и усталостную прочность применены при разработке новых упрочняющих технологий.

Реализация работы. Разработанные методики исследований остаточных напряжений, ударной и усталостной прочности, элементного состава поверхностного слоя, программы для ЭВМ, рекомендации по оптимизации режимов ППД, новые технологии и установки для определения прочностных характеристик и поверхностного деформационного упрочнения применены на предприятиях ЗМКБ "Прогресс" и АО "Мотор Сич", для повышения несущей способности валов, дисков, лопаток и других деталей двигателей АИ-20, Д-36, ТВЗ-117 и Д-18Т.

Основные положения, которые выносятся на защиту:

- закономерности формирования тангенциальных и осевых остаточных напряжений по сечению полых валов и дисков, упрочненных алмазным выглаживанием, с учетом толщины стенки и напряженного состояния от предшествующей обработки;

- методика определения тангенциальных остаточных напряжений на частях колец, вырезанных из крупногабаритных валов ГТД, на приборе ПИОН-2;

- материалы, показывающие, что дополнительное повышение сопротивления усталости деталей ГТД, изготовленных из высоколегированных сталей с сорбитной структурой, можно получить за счет более полного использования резерва пластичности, увеличивая силу и уменьшая кратность приложения нагрузки на втором рабочем ходе алмазного выглаживания;

- материалы исследований, показывающие, что деформационное упрочнение шариками дисков компрессора из сплава ХН73ТЮБ после обработки в псевдосжиженном слое абразива сопровождается благоприятным изменением элементного состава тонкого поверхностного слоя - уменьшением количества и размеров внедренных в поверхность межпазовых выступов абразивных частиц;

- оптимальные режимы и температурные границы эффективного применения деформационного упрочнения деталей ГТД, работающих при повышенных температурах;

- математические модели коэффициентов упрочнения, учитывающие влияние на изменение сопротивления усталости механических характеристик и структуры материалов, концентрации напряжений и масштабного фактора, повышенных температур и параметров вибрационных нагрузок, которые позволяют оптимизировать режимы ППД и прогнозировать повышение несущей способности деталей ГТД (валов, дисков, лопаток и др.);

- оборудование и технологии для пневмодробеструйной обработки внутренних поверхностей длиномерных валов компрессора, программируемого деформационного упрочнения шариками крупногабаритных лопаток вентилятора и лопаток компрессора с тонкими легко повреждаемыми кромками, позволяющее значительно увеличить их несущую способность;

- методики и оборудование для испытаний круглых образцов на усталость при полигармоническом нагружении и испытаний лопаток компрессора на ударную прочность при моделировании условий соударения с посторонним предметом.

Научная апробация работы. Основные результаты работы докладывались на IV научно-технической конференции "Циклическая прочность и ее повышение поверхностным пластическим деформированием" /Пермь, 1974/; I всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование процессов финишной обработки в машиностроении" /Минск,

1975/; научно-технической конференции "Современные технические и технологические методы повышения качества, надежности и долговечности деталей машин" /Киев, 1976/; республиканской научно-технической конференции по "Размерному анализу и статистическим методам регулирования точности технологических процессов" /Запорожье, 1981/; республиканской конференции "Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей и сборки приборов"/Киев, 1978/; III зональной научно-технической конференции "Прогрессивные технологические методы механообработки, сборки и обеспечения качества цилиндрических деталей" /Пенза, 1982/; семинаре "Организация и передовая технология ремонта на базах ремонтных предприятий" /Москва, 1982/; республиканской конференции "Прогрессивные технологические процессы и повышение эффективности механической обработки конструкционных труднообрабатываемых и неметаллических материалов" /Днепропетровск, 1983/; всесоюзном совещании "Повышение надежности и долговечности деталей энергооборудования методами газотермического напыления, диффузионного насыщения и лазерной обработки" /Москва, 1985/; всесоюзной конференции "Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов" /Брянск, 1986/; семинаре "Пути улучшения качества обработки титановых и жаропрочных сплавов резанием" /Киев, 1977/; научно-технической конференции "Повышение качества изготовления деталей машин методами отделочно-упрочняющей обработки" /Пенза, 1991/; республиканской конференции "Прогрессивная технология машиностроения" /Днепропетровск, 1992/; EIGHT INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE [ICF8] /Киев, 1993/; конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии" /Одесса, 1994/; III научно-технической конференции "Неметаллические включения и газы в литейных сплавах" /Запорожье, 1994/; III, IV, V, научно-технических конференциях "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" /Запорожье, 1986, 1989, 1992/, PROCEEDINGS OF VI INTERNATIONAL

SCIENTIFIC CONFERENCE "New Structural Steels and Alloys" /Запорожье, 1995/.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 130 печатных работ, в том числе 2 монографии, 10 авторских свидетельств на изобретения, 1 отраслевой стандарт.

Объем и структура. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержание диссертации изложено на 352 стр., из которых основной текст составляет 240 стр., остальной объем занимает 106 рис., 51 табл., список литературы из 315 наименований и приложения на 16 стр.

Личный вклад автора. Автором выполнены методические разработки, получено и проанализировано большинство экспериментальных результатов, сформулированы идеи основных научных результатов и разработаны математические модели, в которых они применены.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во вступлении обоснована актуальность разработанной в диссертации научно-технической проблемы и основные подходы к ее решению. Кратко изложено содержание диссертации определена научная новизна и практическое значение результатов, полученных при выполнении работы.

В первой главе рассмотрены особенности зарождения и развития усталостных трещин в деталях машин с учетом влияния конструктивных и технологических факторов. Показано, что циклическая пластическая деформация является основным фактором накопления повреждений в металле. Значительное внимание уделено влиянию поверхностного пластического деформирования на кинетику развития усталостной трещины и механизм процесса усталости. ППД предопределяет снижение неоднородности протекания деформаций по микрообъемам, что создает благоприятные условия для более равномерного протекания пластических сдвигов и увеличивает ресурс пластичности материала.

Систематизированы сведения о влиянии наклепа, остаточных напряжений и структуры материалов на изменение сопротивления усталости

деталей машин. Обращено внимание на необходимость учета факторов, связанных с дефектностью поверхностного слоя: наличие в нем неметаллических включений технологических и эксплуатационных концентраторов напряжений, учета влияния геометрических параметров на формирование остаточных напряжений.

Рассмотрено влияние вибро- и гидрогалтовки, обкатки роликами, алмазного выглаживания, ультразвукового упрочнения шариками на формирование свойств поверхностного слоя и сопротивление усталости.

Показана существенно бóльшая упрочняемость мартенситной структуры по сравнению с сорбитной и трооститной. У стали с мартенситной структурой количество дефектов кристаллической решетки растет с увеличением содержания углерода в твердом растворе и существенный вклад в упрочнение вносит эффект взаимодействия дислокаций с атомами углерода.

Сопротивление усталости деталей, работающих при высоких температурах, значительно зависит от глубины и степени наклепа. Характерно, что для каждой температуры нагрева существует своя определенная степень наклепа, которая обеспечивает минимальную скорость процессов разупрочнения. Нет однозначного мнения по эффективности применения поверхностного наклепа деталей, работающих при повышенных температурах.

По определению влияния ППД на сопротивление материалов ударным нагрузкам в упруго-пластической области до последнего времени не получено однозначных выводов. До настоящего времени не установлен "вклад" параметров наклепа и остаточных напряжений в изменение ударной прочности натуральных деталей (лопаток ГТД).

В процессе эксплуатации детали газотурбинных двигателей подвергаются воздействию вибрационных нагрузок, вызванных пуском и остановом, изменением рабочего режима и влиянием других факторов. Отечественными и зарубежными учеными предложен ряд теоретических зависимостей, дающих качественную оценку влияния вибрационных нагрузок на

сопротивление усталости (долговечность), но не позволяют учесть изменение предела выносливости деталей ГТД.

Для прогнозирования эффективности ППД и выбора оптимальных режимов упрочнения все более широкое применение получают аналитические методы, базирующиеся на обширном экспериментальном материале.

Отсутствуют работы и математические зависимости по оптимизации режимов с учетом всех факторов, влияющих на формирование свойств поверхностного слоя, и прогнозированию эффективности упрочнения на стадии разработки технологического процесса.

Вторая глава содержит методические разработки, выполненные для реализации поставленной проблемы. Они касаются методик экспериментального исследования образцов деталей ГТД и оригинальных установок.

Экспериментальное определение влияния свойств поверхностного слоя на сопротивление усталости лопаток ГТД, цилиндрических и плоских образцов без концентраторов и с концентраторами напряжений проводили при консольном изгибе на вибростенде ВЗДС-200 и электромагнитной установке. Испытания на усталость при повышенных температурах проводили при чистом изгибе с вращением на машине МВП-10000. Крупные полые образцы и натурные валы ГТД испытывали при симметричном плоском изгибе на машине УМ-4. На крупных образцах моделировались геометрические параметры валов ГТД: толщина стенки и концентраторы напряжений в виде галтелей и выточек, выполненных на наружной и внутренней поверхностях. Для построения кривой усталости испытывали от 10 до 20 образцов и натурных деталей. База испытаний устанавливалась в пределах $10^7 \dots 10^8$ цикл в зависимости от решаемой задачи.

Для моделирования эксплуатационных нагрузок валов ГТД была разработана установка, которая позволяет создавать при испытании одно-, двух- и трехчастотное нагружение. Полигармоническое нагружение воспроизводится вращением консольно-закрепленного образца с основной частотой f_1 и наложением высокочастотных нагрузок с помощью двух вибраторов с частотами f_2 и f_3 . Уровень напряжений, создаваемый в

опасном сечении образца, определяется независимо от каждого инерционного вибратора и затем тензометрируется при работе установки в заданном режиме.

Для моделирования условий соударения лопаток компрессора высокого давления с инородным телом (птицы, камни) был разработан специальный копер, позволяющий создавать центробежные силы и скорость полета бойков (шаров), близких к реально действующим в экстремальных условиях. В качестве критерия для оценки ударной прочности лопаток была взята величина энергии, необходимая для их разрушения. Сравнительную оценку ударной прочности лопаток, обработанных различными методами на финишных операциях, производили по соотношению разрушенных и пластически деформированных лопаток при идентичных режимах испытания. Для испытаний применяли ограниченную выборку лопаток (10...20 шт.), которая была обоснована по экспериментальным данным с использованием биномиального закона распределения случайных величин.

Для уточнения расчета осевых остаточных напряжений с учетом изменения момента инерции при снятии слоев металла разработан конусный метод крепления цилиндрических стандартных образцов на приборе ПИОН-2, что позволило повысить точность измерения его деформации. В конечном виде формула для расчета осевых остаточных напряжений имеет вид:

$$\sigma_{ос} = \frac{\pi E z^3 (z - 2a) df}{4l^2 (z - \frac{4}{3}\pi a)^2 da}, \quad (1)$$

где E — модуль упругости; r и l — радиус и длина исследуемой части образца; a — толщина снятого слоя металла.

Для определения фактической величины деформации при использовании удлинителей, когда длина исследуемой части образца меньше общей длины образца, предложена формула:

$$f_{ф} = \frac{2f}{2L - f}, \quad (2)$$

где L и l —общая и исследуемая части образца; f —величина деформации образца в точке замера.

В связи с тем, что исследование остаточных напряжений по методу Н.И. Давиденкова на целом кольце больших размеров является трудно-выполнимой задачей (усложняется конструкция прибора и не обеспечивается равномерное снятие поверхностных слоев металла электрополированием), была разработана методика исследования остаточных напряжений на частях колец, вырезанных из крупногабаритных валов ГТД. Это позволяет для одного сечения вала получить несколько эпюр остаточных напряжений и усреднить их значения для уменьшения погрешности эксперимента. Получены зависимости между деформацией целого кольца и его частей, необходимые для расчета остаточных напряжений по формуле И.А. Биргера для целых колец.

Исследования элементного состава поверхности образцов, вырезанных из натуральных деталей ГТД, проводили методом ОЖЕ-спектроскопии на спектрометре LAS2000 при ускоряющем напряжении 5кВ и диаметре электронного зонда 3...5 мкм. Послойный анализ осуществляли с использованием распыления поверхности ионами аргона. При послойном анализе спектры ОЖЕ-электронов записывали в режиме быстрого сканирования электронного зонда по площади 400x570 мкм.

Исследование микроструктуры было выполнено на оптических металломикроскопах "Эпиквант" и МИМ-8М. Дислокационная структура выявлялась на электронном микроскопе модели УЭМ-100К с помощью реплик.

В третьей главе представлены и проанализированы результаты исследования влияния режимов поверхностного деформационного упрочнения на формирование свойств поверхностного слоя и сопротивление усталости валов и дисков ГТД.

Исследование механизма повреждаемости деталей ГТД в процессе эксплуатации показало, что в большинстве случаев причины разрушения связаны с появлением и развитием усталостных трещин в местах концентрации напряжений от следов обработки (рисок, задиров, царапин) и

наличием высокочастотных вибраций.

Совместный анализ результатов исследований параметров наклепа и выносливости образцов, упрочненных алмазным выглаживанием за один рабочий ход из высоколегированных сталей 13X11H2B2MФШ, X12HMBФШ, 40XH2MAШ со структурой сорбита показал, что между ними существует тесная зависимость. Применение выглаживания за два хода с увеличенными силой и подачей на втором рабочем ходе приводит к повышению предела выносливости за счет увеличения параметров наклепа и может служить дополнительным резервом в повышении сопротивления слабоупрочняющихся материалов усталостному разрушению. Этот вывод был подтвержден испытаниями на сжатие упрочненных выглаживанием образцов из стали 13X11H2B2MФШ, имеющих структуру отпущенного сорбита. На выглаженных образцах в пределах $\epsilon = 20 \dots 50\%$ наблюдалось дополнительное повышение микротвердости поверхности. Это показывает, что изменение схемы деформации приводит к более полному использованию резерва пластичности таких материалов.

При выглаживании по упрочняющему режиму с увеличенной силой P_y до 300 Н на втором ходе полых образцов из стали 13X11H2B2MФШ с рабочим диаметром 60 мм и радиусом галтели 5 мм ($\alpha_\epsilon = 1,55$) их предел выносливости увеличился с 275 до 390 МПа, и превысил ϵ -4 шлифованных образцов диаметром 10 мм, равный 380 МПа. При этом, масштабный фактор практически не проявлялся после упрочнения алмазным выглаживанием, выполненном с рациональными режимами, при условии обеспечения равнопрочности наружной и внутренней поверхностей.

Получены закономерности формирования остаточных напряжений в полых валах ГТД при изменении режимов алмазного выглаживания. При толщине стенки вала h менее 3 мм наблюдается снижение уровня сжимающих напряжений в поверхностном слое и соответствующее повышение уровня растягивающих напряжений в упругодеформированной сердцевине, что приводит к подслойному зарождению усталостной трещины.

Уровни остаточных сжимающих и растягивающих напряжений зависят

от соотношения толщины пластически- и упругодеформированных слоев металла. При жестких режимах одностороннее упрочнение только внутренней поверхности вала приводит к образованию в наружном поверхностном слое неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений, уровень которых резко увеличивается при наличии такого же знака напряжений от предшествующей обработки. Для получения упрочняющего эффекта на тонкостенных валах ГТД ($h = 2...3$ мм) необходимо добиваться равнопрочности наружной и внутренней поверхностей за счет недопущения превышения относительной толщины деформированного металла более 0,1 (рис. 1,2). Режим алмазного выглаживания тонкостенных валов должен находиться в пределах $P_y = 100...150$ Н при радиусе сферы алмазного инструмента 2 мм.

Исследования образцов с концентраторами напряжений из высоколегированных сталей, упрочненных алмазным выглаживанием и обкаткой роликами, показали, что эффективность упрочнения при наличии выточек проявляется только в том случае, если их глубина меньше глубины залегания остаточных сжимающих напряжений. Практически во всех случаях полученные значения α_σ превышают эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_σ , что объясняется перераспределением напряжений, вызываемым текучестью металла в пластической зоне. Наиболее резкими концентраторами напряжений являются радиальные отверстия. Для повышения прочности вала с радиальным отверстием следует края отверстия пластически деформировать таким образом, чтобы линия сопряжения закругляющей фаски с поверхностью отверстия не проходила через область максимальной напряженности.

Аналогичные результаты были получены на образцах из сталей 13X11H2B2MФВ, 18X15H3M и сплава ХН77ТВР с охватывающими втулками: пределы выносливости после упрочнения повысились на 23...38% и превысили σ_{-1} шлифованных образцов без втулок за счет повышения прочности наклепанного металла и благоприятного влияния остаточных сжимающих напряжений.

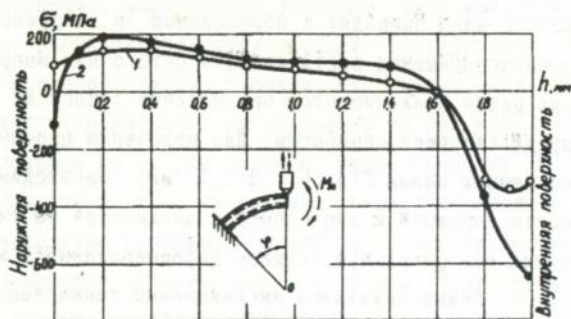


Рис. 1. Распределение тангенциальных /1/ и осевых /2/ остаточных напряжений после выглаживания внутренней поверхности вала компрессора.

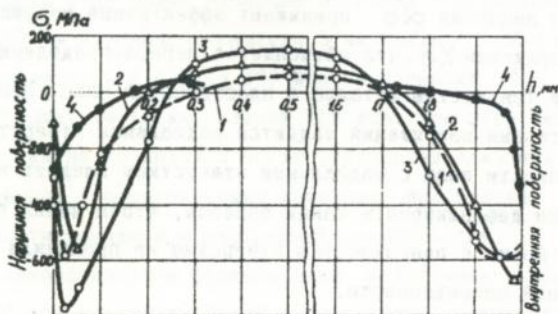


Рис. 2. Распределение тангенциальных остаточных напряжений после выглаживания наружной и внутренней поверхностей вала компрессора /1 - $P_y = 100H$; 2 - $P_y = 150H$; 3 - $P_y = 200H$; 4 - чистовое точение.

При повышенных температурах исследовали обработанные выглаживанием образцы из сплава ХН77ТДР и сталей 40ХН2МАН и 13Х11Н2В2МФН.

Эффект упрочнения жаропрочного сплава практически сохраняется при нагреве до 600°C , высоколегированных сталей до 400°C . Благоприятным является режим упрочнения, обеспечивающий высокий уровень сжимающих остаточных напряжений при сравнительно небольшой степени наклепа, что достигается применением сглаживающих режимов. При умеренных температурах значительный эффект дает реализация упрочняющего режима. В этом случае эпюра сжимающих напряжений имеет максимум под поверхностью, что оказывает тормозящее действие на развитие усталостной трещины.

При оценке влияния технологических факторов на сопротивление усталости элементов дисков воспроизвести в полном объеме эксплуатационные нагрузки не удастся. Был разработан способ сравнительных испытаний секторов с тремя межпазовыми выступами, при котором исключается влияние усилия закрепления на уровень задаваемых напряжений и упрощается изготовление образцов.

В результате испытаний межпазовых выступов дисков VI и VII ступеней компрессора высокого давления из сплава ХН73М6ТВВД установлено, что наиболее сильным концентратором напряжений является кромка выкружки паза в остром углу межпазового выступа. Были проведены исследования по более тщательной доводке и увеличению кромочных радиусов с $0,1 \dots 0,2$ до $0,2 \dots 0,4$ мм, что привело к повышению $S-N$ межпазовых выступов диска на 12% при некотором уменьшении рассеяния значений долговечности.

Испытания по предложенной схеме были применены для сравнения серийной обработки дисков в псевдосжиженном слое абразива (ПСА) и последующего упрочнения шариками диаметром 0,68 мм в ультразвуковом поле.

Исследования элементного состава тонкого поверхностного слоя дисков, обработанных ПСА, методом ОЖЕ-спектроскопии показало повы-

шенное содержание в нем Al и Si. После упрочнения количественный состав химических элементов приблизился к исходному. Механизм такого явления может быть комплексным. Во первых, происходит "очистка" поверхности за счет механического разрушения абразивных частиц упрочняющими шариками. Вторым фактором является пластическая деформация металла, выдавливающая их на поверхность.

Испытания на усталость межпазовых выступов дисков показали, что время упрочнения ($\tau = 20$ с) является недостаточным для формирования благоприятных свойств поверхностного слоя: σ_{-1} увеличивается всего на 10% при незначительном уменьшении рассеяния значений долговечности. Пределы выносливости образцов после упрочнения ($\tau = 40$ и 60 с) отличаются между собой незначительно, но выше, чем у серийных дисков на 31 и 35% при снижении рассеяния значений долговечности. Характер наклона кривых усталости, отражающих "живучесть" образцов при перегрузках, показывает, что наибольшим сопротивлением росту трещины обладают образцы с временем упрочнения $\tau = 60$ с за счет влияния остаточных сжимающих напряжений, залегающих на большей глубине.

При определении запаса прочности деталей машин неблагоприятное воздействие вибрационных нагрузок в основном не учитывается или сводится к увеличению амплитуд основного знакопеременного напряжения на величину, равную высокочастотной составляющей цикла.

Проведенные исследования на усталость образцов из стали 40ХН2МАШ, показали, что вибрации при соотношении частот действующих нагрузок $f_2/f_1 = 7$ и 11,4 приводят к снижению сопротивления усталости по сравнению с одночастотным нагружением, особенно, при наличии концентраторов напряжений.

Для учета влияния вибрационных нагрузок на сопротивление усталости по результатам испытаний образцов из различных материалов была получена корреляционная зависимость, позволяющая прогнозировать изменение σ_{-1}^9 при двухчастотном нагружении по известным значениям параметров эксплуатационного спектра нагружения, механическим, прочно-

стним и геометрическим характеристикам материалов и натуральных деталей:

$$\beta = \frac{\sigma_1^g}{\sigma_{-1}} = 1,16 \frac{(\sigma_m / \sigma_b)^{0,023}}{(f_2 / f_1)^{0,255} (\sigma_{a2} / \sigma_b)^{0,191} \alpha \sigma^{0,141}}, \quad (3)$$

где f_2 / f_1 - отношение частот высокочастотной и основной составляющей цикла; $\alpha \sigma$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений; σ_m / σ_b - отношение среднего напряжения цикла к пределу прочности материала; σ_{-1}^g - предел выносливости при двухчастотном нагружении; σ_{a2} - амплитуда высокочастотной составляющей цикла.

Зная зависимости свойств поверхностного слоя от режимов упрочнения, а также зависимости коэффициентов упрочнения β^y ($\beta^y = \sigma_1^y / \sigma_{-1}$ - отношение пределов выносливости упрочненной и исходной детали) от свойств поверхностного слоя, можно на стадии разработки технологического процесса с заданной достоверностью выбрать оптимальные режимы и прогнозировать изменение предела выносливости деталей энергоустановок.

Исследования свойств поверхностного слоя и испытания на усталость 58 партий образцов из высоколегированных сталей позволили получить зависимость коэффициента упрочнения с высоким коэффициентом множественной корреляции ($R = 0,87$):

$$\beta^y = 0,768 [N^{0,198} (h/r)^{0,053} (\sigma_{ост} / \sigma_b)^{0,008}] / Ra^{0,021}, \quad (4)$$

где N - степень наклепа; h/r - отношение глубины наклепа к радиусу образца; $\sigma_{ост} / \sigma_b$ - отношение величины остаточных напряжений к пределу прочности материала; Ra - параметр шероховатости.

Для оптимизации полученной зависимости (4) было применено движение по градиенту, которое обеспечивает наиболее краткий путь к оптимуму. Результаты оптимизации показали, что увеличение сопротивления усталости гладких образцов диаметром от 10 до 60 мм, в основном, происходит за счет повышения параметров наклепа.

Опыт эксплуатации и испытания на усталость образцов и деталей свидетельствуют о значительном рассеянии параметров выносливости, в основном, из-за нестабильности свойств поверхностного слоя, образованного на финишных операциях технологического процесса. Статистическая обработка по методике Вейбулла результатов усталостных испытаний образцов из стали 13X11H2B2MФШ, обработанных полированием и алмазным выглаживанием показала следующие пределы рассеяния σ_{-1}^b : $12,6 < \bar{\sigma}_{-1} < 19,5$ - полирование; $7,5 < \bar{\sigma}_{-1} < 11,7$ - выглаживание; $5,9 < \bar{\sigma}_{-1} < 7,8$ - выглаживание с дополнительным отпуском. После полирования коэффициент вариации $\bar{V}_{\sigma_{-1}}$, характеризующий рассеяние среднего значения предела выносливости, оказался равным 0,027, выглаживания - 0,0135, выглаживания с дополнительным отпуском - 0,0085. Аналогичные результаты были получены на образцах из стали 40ХН2МАШ, испытанных по методу ступенчатого изменения нагрузки "вверх - вниз" с учетом долговечности разрушенных образцов, которая характеризует их "живучесть" при перегрузках. Для количественной оценки "живучести" образцов был предложен коэффициент K_N , среднее значение которого рассчитывается по формуле:

$$K_N = \left(\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i \right) / (n \cdot N_{\sigma} \bar{\sigma}_{-1}) = \left(\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i \right) / (n Q), \quad (5)$$

где N_i - долговечность испытанных образцов; σ_{-1} - уровень задаваемого напряжения при испытании; $N_{\sigma} = N_{i=1} = 10^7$ - долговечность неразрушенных образцов, равная базе, принятой при испытаниях; n - общее число образцов в серии; $\bar{\sigma}_{-1}$ - среднее значение предела выносливости; $Q = N_{\sigma} \bar{\sigma}_{-1}$ - коэффициент выносливости.

После алмазного выглаживания предел выносливости, определенный для вероятности разрушения $P = 10\%$, увеличился с 495 до 600 МПа по сравнению со шлифованием, коэффициент вариации $\bar{V}_{\sigma_{-1}}$ уменьшился примерно в 1,4 раза, а коэффициент "живучести" практически не изменился ($\bar{K}_N = 0,65$). Уменьшение в 1,4...2 раза рассеяния предела выносли-

ности после упрочняющей обработки свидетельствует о стабилизации свойств поверхностного слоя.

В четвертой главе представлены результаты исследований свойств поверхностного слоя и параметров выносливости лопаток ГТД после различных способов ППД.

В эксплуатации ГТД из всех отказов по причинам усталостных разрушений деталей на лопатки приходится около 60%. Трудоемкость изготовления лопаток в большинстве конструкций составляет 30...40% общей трудоемкости изготовления двигателя. Эти особенности требуют использования в производстве современных технологий, особенно на финишных операциях.

Эффективным способом повышения выносливости лопаток является деформационное упрочнение шариками, в частности виброгалтовка. При увеличении продолжительности виброгалтовки образцов из сплава ВТ8, которая определяет трудоемкость обработки, с 0,5 до 4 ч параметр шероховатости поверхности R_a уменьшился с 0,5 до 0,25 мкм, глубина наклепа увеличилась с 35 до 75 мкм. Наибольший уровень сжимающих остаточных напряжений до 400 МПа зафиксирован на образцах, подвергавшихся упрочнению в течение 2ч, что привело к повышению с 430 до 565 МПа.

Обоснование рациональной продолжительности виброгалтовки было подтверждено исследованиями демпфирующих свойств образцов. Максимальное увеличение логарифмического декремента колебаний в результате рассеяния колебаний в пластически деформированном слое из-за повышения сил микрокристаллического трения и роста напряжений полей дислокаций произошло у образцов, подвергавшихся упрочнению в течение 2 ч (рис. 3).

Аналогичные результаты были получены при исследовании алюминиевых образцов из сплава ВД-17, который применяется для изготовления лопастей турбинок стартера воздушного: предел выносливости при упрочнении в течение 1,5 ч увеличился на 25% по сравнению с полирова-

нием.

Разрушение лопаток компрессора в условиях эксплуатации в большинстве случаев происходит по радиусу перехода в замок из-за наличия концентрации напряжений. Кроме того, при малых радиусах перехода значительно затрудняется обработка, в результате которой возможно образование растягивающих остаточных напряжений и прижогов, снижающих несущую способность материала.

Для оценки эффективности упрочнения исследовали круглые образцы диаметром 9,7 мм из стали 14X17H2Ш после полирования и последующего упрочнения вибро- и гидрогалтовкой с концентраторами напряжений в виде галтелей с радиусами равными 1; 2,5; 5 и 10 мм. Гидрогалтовка сопровождается образованием остаточных сжимающих напряжений до 500 МПа и несколько больших значений параметров наклепа по сравнению с виброгалтовкой. Результаты испытаний на усталость показали, что вибро- и гидрогалтовка в значительной мере уменьшают неблагоприятное влияние концентрации напряжений (рис. 4). Гидрогалтовка является более эффективным способом ППД по сравнению с виброгалтовкой и ее можно рекомендовать для повышения несущей способности стальных лопаток из стали 14X17H2Ш.

Лопатки компрессора, изготовленные из титановых сплавов, и имеющие тонкие легко повреждаемые кромки весьма чувствительны к концентрации напряжений, создаваемых следами обработки (царапины, риски, задиры и др.). Под оптимальным режимом упрочнения таких лопаток понимается режим деформации обеспечивающий высокую выносливость при знакопеременных нагрузках и способность сопротивляться ударным изгибающим нагрузкам, возникающим в эксплуатации при попадании инородных тел в тракт двигателя.

Эта задача была решена испытаниями на усталость образцов из сплава ВТ8 толщиной 1,4 мм и радиусом галтели 1,2 мм, упрочненных шариками диаметрами 2,35 и 1,3 мм ($\zeta = 10$ мин) на ультразвуковой установке. Наиболее значительный эффект наблюдается при упрочнении шарика-

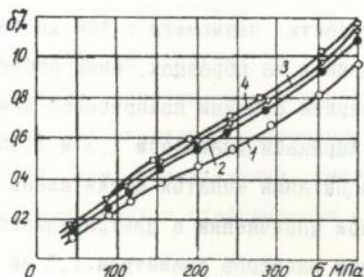


Рис. 3. Изменение логарифмического декремента колебаний от уровня напряжений: 1 - полирование; 2...4 - виброгалтовка в течении 0,5; 2,0 и 4,0 ч. соответственно.

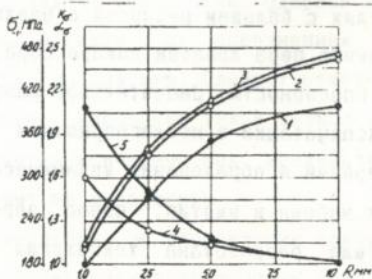


Рис. 4. Изменение $\sigma_{0.2}$, δ_5 и ψ_5 от радиуса галтели образцов: из стали I4X17H2Ш: 1 - полирование; 2 - виброгалтовка; 3 - гидрогалтовка; 1, 2, 3 - $\sigma_{0.2}$; 4 - δ_5 ; 5 - ψ_5 .

ми диаметром 1,3 мм за счет образования благоприятного микропрофиля и наведения остаточных сжимающих напряжений до 350 МПа у поверхности. Предел выносливости повысился с 400 до 480 МПа. Для подтверждения данных, полученных на образцах, были проведены испытания на усталость лопаток первой ступени компрессора двигателя Д-36 из сплава ВТ8, упрочненных шариками диаметром 1,3 и 2,35 мм в течение 5 и 10 мин. Результаты испытаний лопаток убедительно показали, что в качестве рабочих тел при упрочнении в ультразвуковом поле следует применять шарики меньших размеров диаметром 1,3 мм при продолжительности упрочнения $\tau=5$ мин. При этом упрочнение лопаток в течение 5 мин шариками диаметром 1,3 мм обеспечивает равнопрочность кромок и спинки (места зарождения усталостных трещин со стороны спинки и кромок при испытании распределились поровну) и приводит к повышению σ_{-1} с 501 до 649 МПа, т. е. на 29%. Ультразвуковое упрочнение сопровождается стабилизацией свойств поверхностного слоя и нейтрализацией дефектов от следов обработки, что подтверждается уменьшением на 60% рассеяния предела выносливости по сравнению с серийным виброполированием.

На двигателях с большим ресурсом с увеличением наработки происходит разупрочнение пера лопаток компрессора, что приводит к снижению их несущей способности. Значительное разупрочнение лопаток наблюдается при эксплуатации в неблагоприятных условиях, способствующих появлению эрозии и образованию механических повреждений в виде мелких точечных забоин и вмятин: износ передней кромки достигает 0,1...0,3 мм. Была разработана технология восстановления несущей способности лопаток ГТД после длительной наработки с применением методов ППД. Испытания лопаток первой ступени компрессора из стали 14X17H2W двиг. АИ-20 после наработки 1000, 2000 и 4000 ч показали, что эффективным и экономически целесообразным способом восстановления их несущей способности является виброгалтовка, которая улучшает шероховатость поверхности с одновременным удалением поврежденного поверхностного слоя глубиной до 0,02 мм: более крупные повреждения

в значительной мере сглаживались. На лопатках с наработкой 1000 ч остаточные сжимающие напряжения после виброгалтовки достигали 190...280 МПа; 2000 ч — 200...350 МПа, 4000 ч — 150...260 МПа. Глубина напряженного слоя находилась в пределах 50...70 мкм. Все лопатки независимо от наработки имели сопротивление усталости ниже первоначального на 7...14%. После виброгалтовки увеличение пределов выносливости достигало 10...16% при значительном уменьшении рассеяния долговечности, что свидетельствует о стабилизации свойств поверхностного слоя.

Положительные результаты были получены при упрочнении виброгалтовкой лопаток компрессора из стали 13X14HBFPA с двигателя, эксплуатировавшегося на вертолете МИ-8 в течение 400 ч. После наработки на лопатках образовался поврежденный поверхностный слой с большим количеством мелких механических забоин, что привело к снижению σ_{-1} с 410 до 350 МПа. После виброгалтовки за счет улучшения свойств поверхностного слоя пера лопаток с наработкой предел выносливости увеличился с 350 до 420 МПа.

Актуальной является задача обеспечения ударной прочности титановых лопаток компрессора в связи с их упрочнением, которое повышает склонность к хрупкому разрушению. Следует отметить, что появление трещины при соударении с инородным телом является отказом для лопатки, так как практически мгновенно под воздействием знакопеременных нагрузок происходит ее разрушение.

Были проведены исследования по определению влияния режимов упрочнения шариками в ультразвуковом поле лопаток компрессора первой и второй ступеней компрессора на сопротивление ударному разрушению по сравнению с серийным виброполированием.

Для оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление ударному разрушению был проведен упруго-пластический расчет образца, подвергаемого ударному изгибу. В связи с тем, что при ударном изгибе действующие растягивающие напряжения возникают в поверхностных

слоях лопатки и там же формируются остаточные напряжения, влияние последних на ударную прочность может быть значительным.

В результате расчета получена зависимость прогиба конца стержня от динамической силы с учетом влияния остаточных напряжений, которая показывает, что прогиб и угол поворота конца стержня будет несколько больше для стержня с остаточными сжимающими напряжениями, чем без них.

Для экспериментального определения влияния остаточных сжимающих напряжений на сопротивление ударному разрушению были испытаны на центробежном копре четыре партии лопаток первой ступени компрессора из сплава ВТ8 по 16 шт. в каждой. Две партии лопаток были упрочнены шариками диаметром 1,30 мм в течение 5 и 10 мин на ультразвуковой установке.

Ультразвуковое упрочнение ($t=5$ мин) повысило их сопротивление ударному разрушению по сравнению с серийными виброполированными лопатками, что вызвано благоприятным влиянием остаточных сжимающих напряжений, в значительной мере нейтрализующих действие растягивающих напряжений от центробежных сил.

Аналогичные результаты были получены на серийных лопатках второй ступени компрессора из сплава ВТ8 с наработкой 600 ч с последующим ультразвуковым упрочнением (лопатки до установки на двигатель упрочнению не подвергались).

Чтобы подтвердить "вклад" остаточных сжимающих напряжений в увеличение ударной прочности одна партия упрочненных лопаток была отожжена в вакууме в течение 2 ч при температуре 550°C . Установлено, что энергия удара бойком с учетом ее рассеяния, затраченная на разрушение лопаток, составляет 1,57 Дж, что на 41% больше по сравнению с серийными лопатками ($\Sigma = 1,11$ Дж). Стабилизирующий отжиг, проведенный после упрочнения, сопровождался уменьшением уровня остаточных сжимающих напряжений, что привело к уменьшению энергии, требуемой для их разрушения до 1,24 Дж.

Таким образом, ударные испытания на центробежном копре позволяют, в основном, моделировать условия соударения лопаток с инородными телами и оценить их ударную прочность на стадии внедрения технологического процесса с применением ППД, что значительно повышает вероятность прохождения контрольно-сдаточных испытаний по вбрасыванию птицы в тракт двигателя.

Для оценки влияния свойств поверхностного слоя на рассеяние параметров выносливости были испытаны полированные и упрочненные виброгалтовкой лопатки компрессора из стали 14X17H2M. Статистическая обработка данных испытаний с применением линейного регрессионного анализа показала, что в силу отсутствия субъективного фактора, виброгалтовка сопровождается образованием стабильного качества поверхности, уменьшающего рассеяние параметров выносливости.

Повышение несущей способности лопаток ГТД в результате упрочняющей обработки связано с улучшением свойств поверхностного слоя, что может быть обусловлено следующими факторами: созданием благоприятного микрорельефа поверхности, структурными изменениями (появлением упрочняющих фаз) и уменьшением локальных микронапряжений за счет изменения плотности дислокаций.

В результате ультразвуковой и пневмодробеструйной обработки шариками лопаток компрессора из сплава ВТ8 исчезали и не выявлялись даже при больших увеличениях следы вальцовки и механической обработки; образовалась так называемая ячеистая поверхность, которая отличается плавным рельефом, отдельные ячейки - округлыми очертаниями. Средний размер ячеек более чем на порядок превышает ширину следов обработки в неупрочненных лопатках. Последние являются технологическими концентраторами напряжений, в то время, как ячейки представляют собой микрогалтели, снижающие локальную концентрацию напряжений.

Содержание α и β - фазы при переходе от поверхностной зоны к сердцевине лопатки после упрочняющей обработки практически не меня-

лось.

Значительная пластическая деформация при вальцовке лопаток приводит к выстраиванию стенок дислокационных ячеек с образованием "пентообразной" структуры, состоящей из частиц с малой плотностью дислокаций. Изучение дислокационной структуры с применением металлографического анализа и подсчетом количества ямок травления показало, что после упрочняющей обработки улучшается однородность распределения дислокаций в зоне металла у поверхности лопатки по сравнению с виброполированными лопатками.

В пятой главе представлены методика расчета безразмерных критериев и созданные математические модели коэффициентов упрочнения алмазным выглаживанием, обкаткой роликами и обработкой шариками в ультразвуковом поле.

Для анализа процесса деформационного упрочнения применяли понятие физического подобия, которое предусматривает соответствие нагрузочных режимов и сил в зоне контакта, подобие температур и тепловых потоков, соответствие концентрации напряжений, структуры и физико-механических характеристик материалов.

Основной характеристикой подобных процессов являются критерии подобия, которые применительно к процессу алмазного выглаживания определяли с помощью анализа размерностей физических величин. Возможность определения критериев подобия, когда вид аналитической зависимости между факторами неизвестен, позволяет представить данные экспериментальных исследований процесса ППД в обобщенной форме и получить критериальную функциональную зависимость.

Анализ априорной информации и проведенные исследования свойств поверхностного слоя и выносливости образцов и деталей ГТД, упрочненных алмазным выглаживанием, позволили получить соотношение между основными факторами процесса:

$$\varphi(\sigma_{-1}, \sigma_1, P_y, F, S, n, H_B, \sigma_b, \sigma_{0.2}, d, z; R_z, \rho) = 0, \quad (6)$$

где F - площадь контакта при упрочнении; S - подача инструмента; HB - твердость по Бринеллю; σ_1 и $\sigma_{0.2}$ - пределы прочности и текучести материалов; d - диаметр детали в опасном сечении; r - радиус конструктивного концентратора напряжений (галтель, выточка и т. п.); Rz - высота шероховатостей от предыдущей обработки; ρ - радиус скругления впадин шероховатостей; n - коэффициент, характеризующий упрочняемость материалов, определяется при сжатии цилиндрических образцов по кривой упрочнения (n соответствует тангенсу угла ее наклона); $q = \frac{P_y}{F}$ - среднее контактное давление.

В окончательном виде с помощью ЭВМ по специально разработанной программе было получено критериальное уравнение:

$$\beta^y = \frac{\sigma_1^y}{\sigma_1} = \varphi\left(\frac{P_y \cdot a}{F \cdot HB \cdot S}, \frac{\sigma_1}{\sigma_{0.2} \cdot n}, \alpha_{\sigma}^{техн}, \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0}\right), \quad (7)$$

где $\frac{P_y \cdot a}{F \cdot HB \cdot S}$ - характеризует влияние уровня и кратности прилагаемой нагрузки с учетом масштабного фактора на изменение коэффициента упрочнения;

- критерий $\frac{\sigma_1}{\sigma_{0.2} \cdot n}$ - характеризует влияние механических характеристик и структуры обрабатываемых материалов на изменение β^y ;

- критерий $\alpha_{\sigma}^{техн}$ - характеризует влияние концентрации напряжений, создаваемой предшествующей упрочнению следами обработки, на изменение β^y ;

- критерий $\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0}$ - характеризует влияние геометрических параметров деталей (масштабного фактора) и концентрации напряжений на изменение β^y .

Для получения вида функции были статистически обработаны результаты испытаний на усталость 57 партий упрочненных образцов и деталей диаметрами от 7,5 до 60 мм, изготовленных из высоколегированных сталей и сплавов 40ХН2МАН, 13Х11Н2В2МФН, 12ХН3А, 14Х17Н2Н, ХН77ТФР, Х12НМБФН, 18Х15Н3МН.

Уравнение множественной регрессии в стандартизованном масштабе показывало, что наибольший вклад в изменение сопротивление усталос-

ти оказывает режим упрочнения при наличии концентрации напряжений.

В натуральном масштабе линейная зависимость коэффициента упрочнения имеет вид ($R = 0,79$):

$$\beta^y = 0,59 + 0,081 \frac{q \cdot a}{HB \cdot S} + 0,023 \frac{\sigma_6}{\sigma_{0,2} \cdot n} + 0,19 \alpha_{\sigma}^{техн} + 0,03 \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0} \quad (8)$$

Для повышения точности расчета была предложена нелинейная зависимость с учетом взаимодействия безразмерных критериев, что привело к повышению R до 0,84:

$$\beta^y = 0,959 + 0,049 \frac{q \cdot a}{HB \cdot S} \alpha_{\sigma}^{техн} + 0,005 \frac{\bar{\sigma}^2}{\bar{\sigma}_0^2} + 0,025 \frac{\sigma_6}{\sigma_{0,2} \cdot n} - 0,04 \frac{\sigma_6 \cdot \bar{\sigma}}{\sigma_{0,2} \cdot \bar{\sigma}_0} \quad (9)$$

В полученной зависимости имеет место взаимодействие критериев: нагрузочного режима и шероховатости упрочняемой поверхности; механических характеристик материалов и концентрации напряжений. Такое взаимодействие факторов имеет определенный физический смысл: при упрочнении поверхности с грубой исходной шероховатостью необходимо увеличивать силу выглаживания и уменьшать подачу; на более прочных материалах концентрация напряжений проявляется в большей мере.

Процесс обкатки роликами отличается от алмазного выглаживания применением более значительных давлений, что вызвано меньшей твердостью деформирующих инструментов и большими геометрическими размерами. В основном при обкатке действуют те же факторы, однако деформируются значительно большие объемы металла и влияние исходной шероховатости на коэффициент упрочнения будет незначительным.

Для получения вида модели были статистически обработаны результаты испытаний на усталость 80 партий упрочненных обкаткой роликами образцов и натуральных деталей, изготовленных из конструкционных сталей и сплавов:

$$\beta^y = 0,725 + 0,0196 \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0 \cdot n} - 0,0472 \frac{\bar{\sigma} \cdot a}{\bar{\sigma}_0 \cdot S} + 0,152 \frac{\sigma_6 \cdot a}{\sigma_{0,2} \cdot S} - 0,01 \frac{q \cdot a}{HB \cdot S} \quad (10)$$

В полученной зависимости наблюдается взаимодействие кратности приложения нагрузки с концентрацией напряжений и механическими ха-

характеристиками материалов, что подтверждается результатами исследований в этой области, проведенными отечественными и зарубежными учеными.

При повышенных температурах резко изменяются значения механических характеристик, оказывающих значительное влияние на сопротивление усталости материалов. Для получения математической модели коэффициента упрочнения алмазным выглаживанием с учетом влияния повышенных температур были обработаны результаты испытаний на усталость 13 партий образцов из сталей 40ХН2МАН, 13Х11Н2В2МФФ и сплава ХН77ТФР.

Зависимость для расчета коэффициента упрочнения с учетом влияния повышенных температур имеет вид:

$$\beta^4 = 0,135 + 0,071 \frac{q \cdot a}{H\delta \cdot S} + 0,952 \frac{\sigma_b^T}{\sigma_{0,2}^T} - 0,149 E \cdot 10^{-4} \cdot \alpha \cdot T, \quad (11)$$

где σ_b^T и $\sigma_{0,2}^T$ — пределы прочности и текучести, определенные при повышенных температурах; α — коэффициент линейного расширения; T — величина температуры в градусах Цельсия.

Для получения универсальной модели коэффициента упрочнения поверхностным пластическим деформированием (алмазным выглаживанием и обкаткой роликами) все данные были объединены в генеральную совокупность с учетом возрастания дисперсии. Затем генеральная совокупность была разделена на обучающую ($N = 62$, нечетные данные) и проверочную ($N = 61$, четные данные) последовательности. С помощью шагового регрессионного анализа была выбрана оптимальная структура модели по обучающей последовательности и произведены расчеты по результатам исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными, показавшие хорошую сходимость результатов. Ошибка в определении в большинстве случаев не превышала 10%.

Математическая зависимость для расчета коэффициента упрочнения алмазным выглаживанием и обкаткой роликами имеет вид:

$$\beta^y = 1,278 + 0,005 \frac{\bar{G}^2}{\bar{G}_c^2} - 0,008 \frac{q \cdot a \cdot \bar{G}}{HB \cdot S \cdot \bar{G}_c} + 0,109 \frac{q \cdot a \cdot \Delta \epsilon^{техн}}{HB \cdot S} -$$

$$- 0,114 \frac{\Delta \epsilon^{техн} \cdot \bar{G}}{\bar{G}_c} - 0,099 \frac{q \cdot a}{HB \cdot S} + 0,194 \frac{\bar{G}}{\bar{G}_c} - 0,006 \frac{\epsilon_{0,2} \cdot \bar{G}}{\epsilon_{0,2} \cdot n \cdot \bar{G}_c} \quad (12)$$

Безразмерные критерии обладают общностью и полученную зависимость можно применять для расчета коэффициента упрочнения деталей энергетических установок из других материалов.

Наглядное представление о влиянии безразмерных критериев на изменение коэффициента упрочнения даст графики, представленные на рис. 5. Характерно, что при определенных значениях критериев и их взаимодействии имеются зоны с коэффициентами упрочнения $\beta^y \leq 1$. Такое явление можно объяснить перенаклепом поверхности при превышении нагрузочного режима, который сопровождается ее повреждением и образованием микротрещин.

Для повышения достоверности предварительного расчета на стадии разработки технологического процесса необходимо знать получаемую ошибку (отклонение между расчетными и опытными значениями β^y в %). По результатам испытаний на усталость и расчетным путем была получена математическая зависимость величины ошибки δ коэффициента упрочнения от тех же аргументов (безразмерных критериев):

$$\delta = 17,2 \frac{\epsilon_{0,2} \cdot \bar{G}}{\epsilon_{0,2} \cdot n \cdot \bar{G}_c} - 12,1 \Delta \epsilon^{техн} - 0,355 \frac{q \cdot \epsilon_{0,2} \cdot a}{HB \cdot S \cdot \epsilon_{0,2} \cdot n} + 0,004 \left(\frac{q \cdot a}{HB \cdot S} \right)^2 +$$

$$+ 0,085 \left(\frac{\epsilon_{0,2}}{\epsilon_{0,2} \cdot n} \right)^2 + 3,17 \frac{q \cdot a}{HB \cdot S} - 0,782 \frac{\bar{G} \cdot \Delta \epsilon^{техн}}{\bar{G}_c} \quad (13)$$

Для определения коэффициента упрочнения при минимальном или заданном значении ошибки были построены контурные кривые поверхностей откликов β^y и δ (рис. 6).

Последующий анализ совмещенных двухмерных сечений позволяет уточнить выбранный режим поверхностного деформационного упрочнения, обеспечивающий более высокое значение β^y . Анализ результатов исследова-

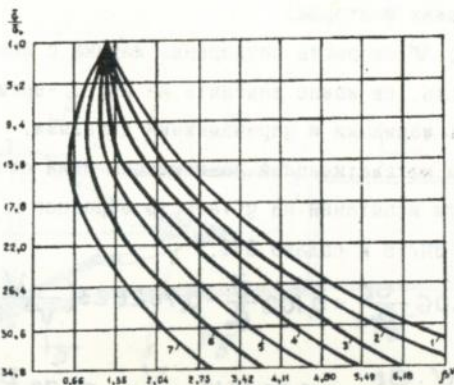


Рис. 5. Изменение коэффициента упрочнения в зависимости от \bar{G}/\bar{G} ; $Q_0 Q / H B S$ /1...7/ = 1,4,7,10, 13,16,19 соответственно; $\sigma_0/\sigma_{0,2} = 9$; $\alpha_{\sigma}^{тех} = 1$.

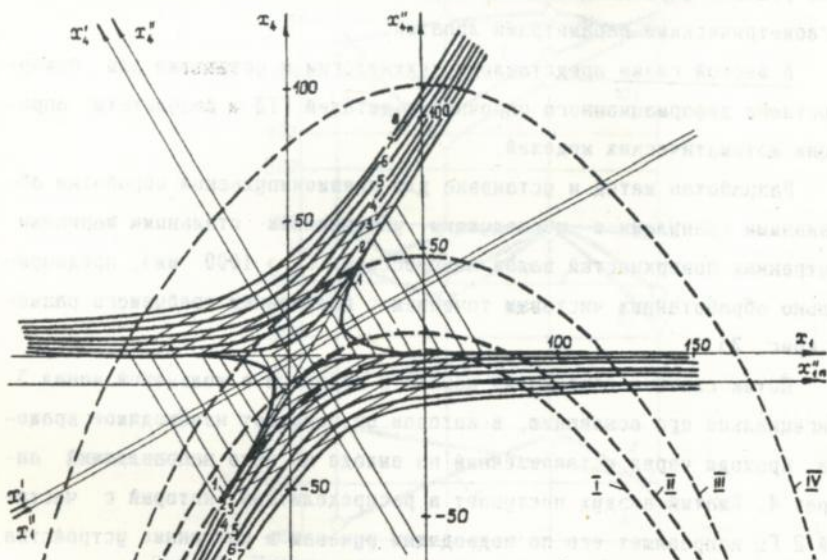


Рис. 6. Двухмерные сечения поверхностей откликов β^y и δ при значениях $\sigma_0/\sigma_{0,2} = 10$ и $\alpha_{\sigma}^{тех} = 1$.
 I...8 - $\beta^y = 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6$; I, II, III, IV -
 - $\delta = 5, 10, 20$ и 50%

дования процесса ультразвукового упрочнения лопаток позволяет остановиться на следующих факторах:

D - диаметр шариков; V - скорость соударения шарика с лопаткой; HD - динамическая твердость, ее можно заменить на HB ; τ - время упрочнения; V - объем камеры с шариками и упрочняемыми деталями.

Для получения математической зависимости были статистически обработаны результаты испытаний на усталость образцов и лопаток компрессора из стали ЭП718 и сплава ВТ8:

$$\beta^4 = 0,138 + 0,606 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}} + 0,102 \frac{\bar{G}}{\bar{G}_0} - 0,762 E 23 \left(\frac{V}{v^3 \cdot \tau^3} \right)^2 - 0,391 E 12 \frac{V \cdot \sigma_{0,2}}{v^3 \cdot \tau^3 \bar{G}_{0,2}} + 0,665 E 12 \frac{V}{v^3 \cdot \tau^3} - 0,373 \frac{D M v \cdot \bar{G}}{V \cdot HB \cdot \tau \cdot \bar{G}_0} \quad (14)$$

В полученной зависимости ($R = 0,87$ и $\delta = 3\%$) имеет место взаимодействие режимов упрочнения с механическими характеристиками материалов и геометрическими параметрами лопаток.

В шестой главе представлены технологии и установки для поверхностного деформационного упрочнения деталей ГТД и результаты апробации математических моделей.

Разработан метод и установка для пневмоимпульсной обработки абразивными гранулами с последующим упрочнением стальными шариками внутренних поверхностей валов компрессора ($L > 1000$ мм), предварительно обработанных чистовым точением с получением требуемого размера (рис. 7).

Поток сжатого воздуха из канала 2 подается в кольцевой канал 3 тангенциально его основанию, в котором он получает необходимое вращение, проходя через установленный на выходе из него направляющий аппарат 4. Сжатый воздух поступает в распределитель, который с частотой 2 Гц направляет его по подводящим рукавам в разгонные устройства, расположенные с противоположных сторон рабочей камеры (внутренняя поверхность обрабатываемого вала 1). Пульсирующий воздушный поток,

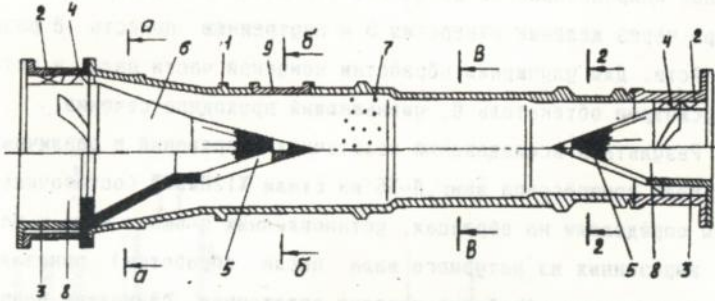


Рис. 7. Схема установки для пневмоимпульсной обработки валов компрессора

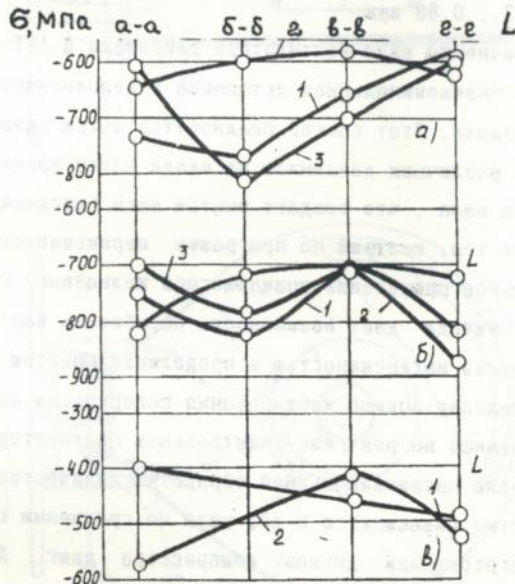


Рис. 8. Уровни остаточных напряжений в диаметральных сечениях вала: б - обработка образцов шариками; в - обработка вала гранулами и шариками; 1, 3 - вертикальные сечения, верх и низ соответственно; 2 - горизонтальное сечение.

выходя из разгонных устройств, смешивается с рабочими телами 7, находящимися в рабочей камере, и приводит их в возвратно-поступательное спиралеобразное движение. Отработанный воздух удаляется из камеры через щелевые отверстия 5 и внутреннюю полость 8 разгонных устройств. Для улучшения обработки конусной части вала в установке предусмотрен обтекатель 6, уменьшающий проходное сечение.

Результаты исследований остаточных напряжений в различных сечениях вала компрессора двиг. Д-36 из стали Х12НМБФШ (остаточные напряжения определяли на образцах, установленных в окнах вала и на образцах, вырезанных из натурального вала после обработки) показали, что пневмоимпульсная обработка наводит остаточные сжимающие напряжения высокого уровня, равномерно распределенные по длине (рис. 8). При этом, образуется благоприятный микропрофиль с величиной шероховатостей $Ra = 0,77 \dots 0,88$ мкм.

Для упрочнения вала вентилятора двигателя Д-18Т ($L=2895$ мм) была применена пневмоимпульсная установка с дополнением нового способа подачи воздуха. Этот способ реализуется путем одновременной подачи воздуха с различным давлением на входе через завихрители с двух торцов полого вала, что создает внутри него вращающийся кольцевой поток рабочих тел, который по программе перемещается соосно валу. Последовательное применение вращающегося кольцевого потока и пневмоимпульсного метода дает возможность обработать вал вентилятора по частям, управляя интенсивностью и продолжительностью упрочнения.

Сравнительная оценка шаржирования поверхности абразивными зёрнами, выполненная на рентгено-спектральном анализаторе МАР-2, показала, что после пневмоимпульсной обработки количество внедренных абразивных частиц уменьшается в два раза по сравнению со шлифованием.

При изготовлении дисков компрессора двиг. АИ-20 из стали 18Х15НЗМШ на обработанной точением и полированием поверхности полотно остаются следы инструмента, внедренные абразивные зёрна, являющиеся технологическими концентраторами напряжений. Для замены ручно-

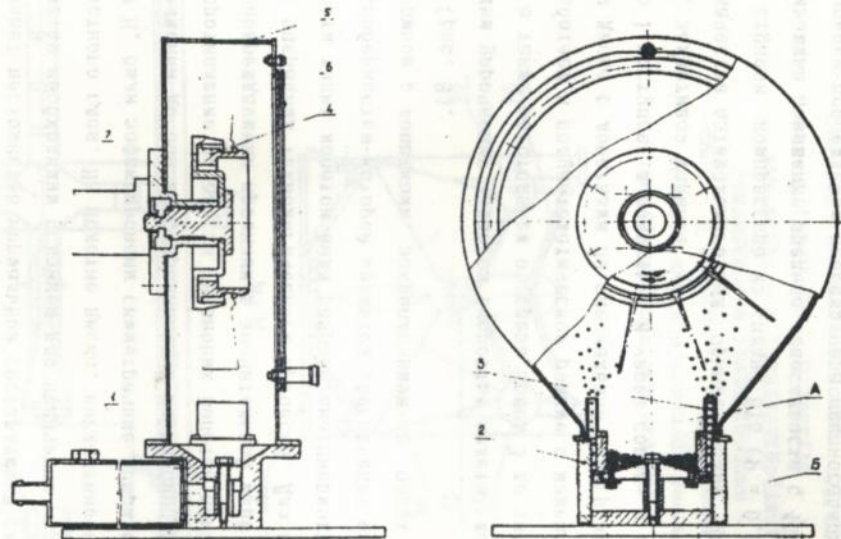


Рис. 9. Схема установки для пневмодробеистой упрочнения шариками лопаток компрессора: I - ресивер; 2 - дробесборник; 3 - сопло; 4 - диск; 5 - корпус; 6 - сетчатый экран, 7 - исполнительный механизм постоянного тока типа МЗК - 2.

го полирования алмазным выглаживанием было разработано поворотное устройство с числовым программным управлением, позволяющее упрочнить полотно с выходом на галтель, радиус которой соизмерим с радиусом алмазного инструмента. Это устройство совместно с системой управления станка позволяет ориентировать алмазный инструмент в процессе обработки по нормали к обрабатываемой поверхности диска и обеспечивает постоянство нормальной составляющей силы выглаживания, что является необходимым условием для получения стабильных свойств поверхностного слоя. На полотне диска, выглаженного с двух сторон с $P_y = 150 \text{ Н}$, были зафиксированы симметричные эпюры остаточных сжимающих напряжений до 800 МПа , проникающих на глубину до 400 мкм .

Сопротивление усталости титановых лопаток компрессора с тонкими легкоповреждаемыми кромками в значительной мере обеспечивается на финишных операциях технологического процесса. Для повышения несущей способности таких лопаток была разработана пневмодробесушная установка, особенность которой является обеспечение скользящего соударения шариков с лопатками, закрепленными в пазах 12 вращающегося диска 4 (рис. 9).

Режим упрочнения задается скоростью полета шариков в рабочей камере, а также расстоянием от среза сопел 3 до торца лопаток. Установка работает в полуавтоматическом режиме с изменением направления вращения диска с лопатками по специальной программе. Воздух через ресивер 1 поступает в полость Б и через сопла - в рабочую камеру установки, захватывая шарики.

В качестве оптимального был принят режим упрочнения лопаток первой ступени компрессора из сплава ВТ8 ($P = 0,1 \text{ МПа}$; $\tau = 3 \text{ мин}$), обеспечивающий повышение предела выносливости с 430 до 470 МПа .

Основные повреждения профиля пера крупногабаритных лопаток вентилятора двиг. Д-18Т в процессе эксплуатации: эрозионно-коррозионный износ профиля, забоины и вмятины, а также износ по торцу пера вследствие температурных деформаций. Наличие на поверхности лопатки

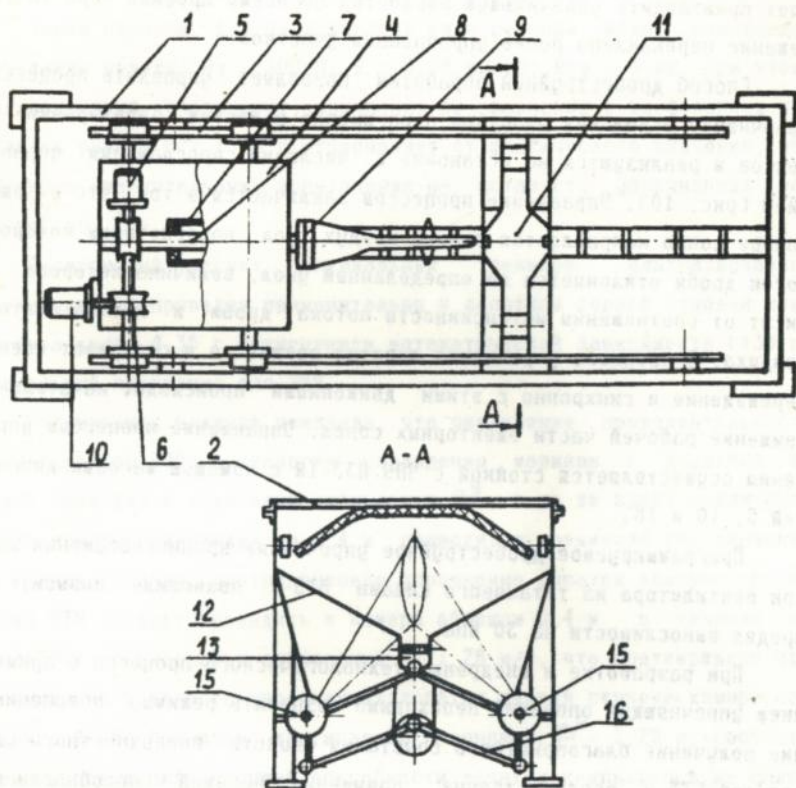


Рис. 10. Схема установки для программируемого упрочнения крупногабаритных лопаток вентилятора ГТД: I - корпус; 2 - крышка; 3 - направляющие; 4 - каретка; 5 - электродвигатель; 6 - червячная пара; 7 - втулка; 8 - шпindel; 9 - замок; 10, 16 - шаговые электродвигатели; 11 - дробесборник; 12 - стенка; 13 - поддон; 14 - штorka; 15 - сопло.

упрочненных и неупрочненных заполированных при ремонте зон не позволяет производить упрочняющую обработку по всему профилю пера во избежание перенаклепа ранее упрочненных участков.

Способ дробеструйной обработки позволяет управлять процессом упрочнения отдельных участков пера именно в местах заполировки дефектов и реализуются на установке с числовым программным управлением (рис. 10). Управление процессом заключается в том, что в эжекторное сопло направляется сжатый воздух под воздействием которого поток дроби отклоняется на определенный угол, величина которого зависит от соотношения интенсивности потока дроби и потока сжатого воздуха. В процессе упрочнения лопатка вращается и совершает осевое перемещение и синхронно с этими движениями происходит качательное движение рабочей части эжекторных сопел. Управление процессом упрочнения осуществляется стойкой с ЧПУ НЗЗ-1М с помощью шаговых двигателей 5, 10 и 16.

Программируемое дробеструйное упрочнение крупногабаритных лопаток вентилятора из титанового сплава ВТЗ-1 позволило повысить их предел выносливости на 30 МПа.

При разработке и внедрении технологического процесса с применением упрочняющих операций необходимо назначить режимы, обеспечивающие получение благоприятного сочетания свойств поверхностного слоя деталей ГТД и, соответственно, повышение несущей способности при приемлемой трудоемкости обработки.

Был произведен расчет и экспериментальная проверка алмазного выглаживания вала-рессоры двиг. АИ-20 с применением математической зависимости (12) по специальной программе для ЭВМ. В качестве предшествующей выглаживанию обработки применяли шлифование. Расчет β^y показал, что снижение твердости с НВ 3500 до НВ 2350 за счет устранения термообработки, может привести к повышению предела выносливости вала-рессоры. Увеличение подачи до $S=0,12$ мм/об приводит к значительному уменьшению β^y , в то же время повышение силы выглаживания P_y

с 200 до 300 Н приводит к увеличению его значения.

Таким образом, для выглаживания вала рессоры можно рекомендовать такие режимы: $P_y = 300 \text{ Н}$; $S = 0,08 \text{ мм/об}$; $R_{сф} = 3 \text{ мм}$. При этом прогнозируемый коэффициент упрочнения по сравнению с шлифованием получается равным $\beta^y = 1,40$ с отклонением от фактического значения, полученного сравнительными испытаниями на усталость упрочненных валов-рессор, $\delta = 7\%$.

Аналогичный расчет оптимальных режимов ультразвукового упрочнения был проведен применительно к лопаткам первой ступени компрессора двиг. Д-36 с применением математической зависимости (13) по специальной программе для ЭВМ.

Оптимизация режимов показала, что увеличение продолжительности упрочнения до 900с и скорости соударения шариков с лопаткой до 50 м/с приводит к заметному уменьшению β^y , в то же время увеличение объема камеры с шариками до 0,4 м приводит к повышению его значения.

Таким образом, ультразвуковое упрочнение лопаток компрессора из сплава ВТ8 следует проводить в камере объемом 0,4 м в течение не более 300с со скоростью соударения $v = 28 \text{ м/с}$, что подтверждено испытаниями на усталость упрочненных лопаток первой ступени компрессора двиг. Д-36. При этом, достигается получение $\beta^y = 1,26$ и, соответственно, повышение несущей способности лопаток компрессора из сплава ВТ8.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Решена крупная народохозяйственная задача технического и технологического обеспечения ресурса энергетических установок на основе применения новых упрочняющих технологий и разработанного математического аппарата для оптимизированного выбора режимов и прогнозирования несущей способности высоконагруженных деталей.

2. Осуществлено системное исследование свойств поверхностного слоя деталей ГТД (валов, дисков), создаваемого на финишных операциях с применением алмазного выглаживания.

Показано, что уровень и характер распределения остаточных напряжений в деталях с толщиной стенки до 2...3 мм, в основном, определяется соотношением пластически и упругодеформированных слоев металла и видом напряженного состояния от предшествующей обработки. Отношение глубины наклепа к толщине стенки не должно превышать 0,1.

Установлено, что деформационное упрочнение тонкостенных валов необходимо производить по наружной и внутренней поверхностям на сглаживающем режиме с целью обеспечения их равнопрочности. При этом масштабный фактор практически не проявляется.

3. Показано, что дополнительным резервом в повышении несущей способности деталей из высоколегированных сталей со структурой сорбита является более полное использование запаса пластичности — применение второго рабочего хода алмазного выглаживания с увеличенной силой (пропорциональной степени наклепа после первого рабочего хода) и уменьшение кратности приложения нагрузки.

4. Эффективность деформационного упрочнения деталей ГТД, работающих при знакопеременных нагрузках в условиях повышенных температур, в значительной мере определяется соотношением параметров наклепа. При небольших ресурсах и температурах, не превышающих температуры рекристаллизации металла, более значительный эффект дает применение режимов упрочнения, обеспечивающих большую глубину при умеренной степени наклепа, что замедляет процесс охрупчивания металла с поверхности детали, способствуя переводу очага зарождения усталостной трещины в упруго-деформированную сердцевину. Эффективность деформационного упрочнения деталей из сталей 40XН2МАН и 13X11Н2В2МФШ в значительной мере сохраняется до 400°С, из сплава ХН77ТВР — до 600°С.

5. Установлено, что алмазное выглаживание и упрочнение шариками деталей ГТД позволяет в 1,2...1,5 раза увеличить пределы выносливости и в 1,3...2,0 раза уменьшить их рассеяние, что свидетельствует о нейтрализации технологических концентраторов напряжений, созданных на предшествующих операциях механической обработки, и стабилизации

свойств поверхностного слоя. Основной "вклад" в повышение несущей способности натуральных деталей с концентраторами напряжений оказывают сжимающие остаточные напряжения с достаточной глубиной залегания в зонах надреза, галтели и напрессованной втулки. Для повышения несущей способности валов и дисков ГТД с радиальными отверстиями необходимо их крошки пластически деформировать таким образом, чтобы линия сопряжения закругляющей фаски с поверхностью отверстия не проходила через область максимальной напряженности.

6. Показано, что ультразвуковое упрочнение межлазовых дисков компрессора из жаропрочного сплава ХН73ТЮП двиг. Д-36 после обработки в псевдооживленном слое абразива сопровождается благоприятным изменением элементного состава тонкого поверхностного слоя - уменьшением процентного содержания неметаллических включений за счет разрушения абразивных частиц упрочняющими шариками и пластической деформации, выдавливающей их на поверхность.

7. Создана установка и технология пневмодробеструйного упрочнения титановых лопаток компрессора с тонкими легкоповреждаемыми крошками. Упрочнение сопровождается образованием благоприятного микро рельефа поверхности за счет скользящего удара шариков полностью устраняются следы вальцовки и механической обработки технологических концентраторов напряжений; поверхность имеет вид ячеек, представляющих собой микрогалтели, снижающие локальную концентрацию напряжений; после упрочняющей обработки распределение дислокаций в зоне металла, непосредственно примыкающей к поверхности спинки лопатки становится более однородной по сравнению с виброполированием.

8. Анализ факторов, влияющих на изменение сопротивления усталости деталей ГТД, позволил создать математическое описание процесса поверхностного пластического деформирования, разработать алгоритм и программу для расчета безразмерных комплексов математической модели коэффициента упрочнения с учетом режимов обработки, механических характеристик, структуры материалов, уровня концентрации нап-

ряжений, масштабного фактора и повышенных температур.

9. С помощью теории подобия и анализа размерностей впервые получены математические модели коэффициентов упрочнения натуральных деталей энергетических установок методами алмазного выглаживания, обкатки роликами и ультразвукового упрочнения шариками. Эти модели позволяют прогнозировать ожидаемую величину коэффициента упрочнения натуральных деталей и оптимизировать режимы ППД с помощью ЭВМ по специально разработанным программам на стадии внедрения технологического процесса в производство. Апробация модели коэффициента упрочнения показала удовлетворительную сходимость рассчитанных и экспериментальных значений коэффициентов упрочнения, полученных автором и взятых из литературных источников.

10. Разработана методика и создано оборудование для моделирования условий соударения деталей ГТД с инородным телом и оценки их ударной прочности на стадии разработки технологического процесса с применением поверхностного деформационного упрочнения. Установлено, что упрочнение лопаток компрессора из сплава ВТ8 шариками в ультразвуковом поле на 40% повышает величину энергии, затраченную на их ударное разрушение, в основном, за счет действия остаточных сжимающих напряжений, нейтрализующих неблагоприятное влияние наклепа тонкого поверхностного слоя и уменьшающих уровень действующих растягивающих напряжений от центробежных нагрузок.

11. Разработана методика и установка для оценки влияния дополнительных вибрационных нагрузок на сопротивление усталости при консольном изгибе с вращением. Получена математическая зависимость, позволяющая прогнозировать изменение предела выносливости при наличии вибрационных нагрузок с учетом механических характеристик материалов, концентрации напряжений и параметров эксплуатационного спектра нагружения деталей ГТД.

12. Разработаны новые установки и технологии деформационного упрочнения шариками малоразмерных лопаток с тонкими кромками, круп-

ногабаритных валов, дисков, лопаток вентилятора и др. деталей двигателей АИ-20, ТВЗ-117, Д-36, Д-18Т. Разработанные упрочняющие технологии, рекомендации по оптимизации режимов ППД и оценке его эффективности внедрены на предприятиях авиационной промышленности и Минэнерго Украины, что позволило значительно повысить надежность и долговечность высоконагруженных деталей энергетических установок и получить фактический экономический эффект около 700000 руб. в ценах 1990 г.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Яценко В.К., Зайцев Г.З., Притченко В.Ф. и др. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием. - М.: Машиностроение, 1985. - 232 с.

2. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. - К.: Изд. фирма "Манускрипт" при управлении делами АН Украины, - 1993. - 333 с.

3. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Бондарь М.П. Влияние алмазного выглаживания на качество поверхности и усталостную прочность стали ЭИ-961. // Пробл. прочности. - 1972. - №1. - С. 105-108.

4. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Семенов Р.А. и др. Влияние алмазного выглаживания на качество поверхности и усталостную прочность стали Х12НМБФ. //Авиационная промышленность - 1973. - №3. - С. 27-30.

5. Яценко В.К., Притченко В.Ф., Ивченко Л.И. Оценка рассеяния пределов выносливости при применении алмазного выглаживания. //Авиационная промышленность. - 1978. - №12. - С.18-20

6. Яценко В.К. Статистическая оценка эффективности поверхностного упрочнения деталей ГТД. // Авиационная промышленность. - 1979. - №12. - С. 17-19.

7. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Ивченко Л.И. Влияние способов обработки на чувствительность стали ЭИ-961 к концентрации напряжений при переменных нагрузках. // Пробл. прочности. - 1972. - №2. -

С. 107-110.

8. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Ищенко Л.И. Повышение вынос-
ливости деталей с прессовыми посадками алмазным выглаживанием. // *Вестн. машиностроения*. - 1972. - №7. - С. 52-54.

9. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Ищенко Л.И. Повышение вынос-
ливости стали ДИ-1 в условиях прессовых соединений и коррозионной
среды. // *Пробл. прочности*. - 1974. - №12. - С. 96-98.

10. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Бакай А.Ф. и др. Алмазное
выглаживание тонкостенных валов КВД. // *Авиац. пром-сть*. - 1975. -
№1. - С. 21-33.

11. Зайцев Г.З., Яценко В.К. Влияние режимов упрочнения алмаз-
ным выглаживанием на усталостную прочность валов. // *ЦИИИТМАШ*. -
1976. - Кн.112. - С. 228-233.

12. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Петергеря Д.И. и др. Влия-
ние алмазного выглаживания на качество поверхности валов винта ГТД.
// *Авиац. пром-сть*. - 1976. - №7. - С. 20-22.

13. Яценко В.К., Притченко В.Ф. Повышение усталостной прочнос-
ти тонкостенных валов ГТД. // *Авиац. пром-сть*. - 1980. - №4. -
С. 23-25.

14. Яценко В.К. Оценка эффективности алмазного выглаживания де-
талей ГТД. // *Пробл. прочности*. - 1983. - №6. - С. 115-119.

15. Благовещенский В.И., Яценко В.К., Притченко В.Ф. и др.
Пневмоимпульсная обработка внутренних поверхностей валов ГТД. // *Авиац. пром-сть*. - 1984. - №2. - С. 14-17.

16. Яценко В.К., Богуслаев В.А., Притченко В.Ф. Отделочноупроч-
няющая обработка внутренних поверхностей валов ГТД. // *Авиац.
пром-сть*. - 1992. - №12. - С. 7-9.

17. Зайцев Г.З., Мамаева Е.И., Яценко В.К. Закономерности изме-
нения сопротивления усталости сталей при двухчастотном нагружении.
// *Вестн. машиностроения*. - 1975. - №5. - С. 25-27.

18. Зайцев Г.З., Яценко В.К. Влияние концентрации напряжений на

сопротивление усталости стали при двухчастотном нагружении. // Заводская лаборатория. - 1977. - №11. - С. 1898-1401.

19. Яценко В.К., Зайцев Г.З. Оценка усталостной прочности сталей при двухчастотном нагружении. // Вестн. машиностроения. - 1986. - №1. - С. 15-17.

20. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Петергеря Д.М. Повышение выносливости сплава ЗИ-437Б. // Авиац. пром-сть. - 1972. - №1. - С. 58-60.

21. Яценко В.К., Корневский Е.Я. Устойчивость физико-механических характеристик поверхностного слоя сплава ЗИ-437Б при повышенных температурах. // Резание и инструмент. Изд-во ХГУ. 1975, вып. 12. - С. 56-60.

22. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Петергеря Д.М. Устойчивость эффекта алмазного выглаживания стали ЗИ-961 при повышенных температурах. // Металловедение и термич. обработка металлов. - 1973. - №6. - С. 77-78.

23. Яценко В.К., Зайцев Г.З. Влияние алмазного выглаживания на выносливость при повышенных температурах стали 40ХНМА. // Металловедение и термич. обработка металлов. - 1974. - №12. - С. 21-23.

24. Яценко В.К., Корневский Е.Я. Эффективность ультразвукового упрочнения лопаток турбины при повышенных температурах. // Авиац. пром-сть. - 1987. - №6. - С. 27-28.

25. Яценко В.К. Оценка эффективности деформационного упрочнения деталей ГТД при повышенных температурах. // Авиац. пром-сть. - 1990. - №7. - С. 24-26.

26. Яценко В.К., Корневский Е.Я., Думанская В.А. Алмазное выглаживание дисков компрессора ГТД. // Авиац. пром-сть. - 1983. - №8. - С. 18-19.

27. Яценко В.К., Сахно А.Г. Оценка усталостной прочности межпазовых дисков компрессора. // Авиац. пром-сть. - 1990. - №11. - С. 24-26.

28. Сахно А.Г., Яценко В.К., Стебельков И.А. Оптимизация режима ультразвукового упрочнения ободной части дисков компрессора. //

Авиационная промышленность, - 1973, - №2, - С. 12-13.

29. Корневский Е.Я., Яценко В.К. Восстановление рабочих лопаток компрессоров виброгалтовкой. // Самолетостроение и техника воздушного флота: Сб. науч. тр. - ХАИ, - 1970, - №22, - С. 121-126.

30. Корневский Е.Я., Яценко В.К. Выбор рационального режима виброгалтовки при упрочнении деталей из титанового сплава BT8, // Пробл. прочности, - 1970, - №11, - С. 23-25.

31. Корневский Е.Я., Яценко В.К., Хуповка В.П. Оценка эффективности упрочнения вибро- и гидрогалтовкой лопаток компрессора из стали 14X17H2. // Авиационная промышленность, - 1984, - №7, - С. 22-23.

32. Яценко В.К., Стебельков И.А., Притченко В.Ф. и др. Выбор оптимального режима при поверхностном упрочнении лопаток газотурбинных двигателей в ультразвуковом поле. // Пробл. прочности, - 1985 - №8, - С. 68-71.

33. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Гармаш А.В. Пневмодробеструйное упрочнение лопаток ГТД. // Пробл. прочности, - 1995, - №8, - С. 91-94.

34. Яценко В.К., Стебельков И.А., Притченко В.Ф. и др. Сопротивление лопаток ГТД ударным нагрузкам. // Авиационная промышленность, - 1983, - №4, - С. 15-17.

35. Яценко В.К., Михайлов С.Б., Стебельков И.А. и др. Сопротивление лопаток усталостному разрушению и ударным нагрузкам. // Авиационная промышленность, - 1984, - №5, - С.20-22.

36. Яценко В.К., Михайлов С.Б., Притченко В.Ф. Ударная прочность лопаток ГТД. // Пробл. прочности, - 1989, - С. 113-116.

37. Яценко В.К. Оценка эффективности алмазного выглаживания с помощью теории подобия усталостного разрушения. // Пробл. прочности, - 1980, - №1, - С. 56-58.

38. Яценко В.К. Комплексная оценка эффективности алмазного выглаживания деталей машин. // Резание и инструмент: Сб. науч. тр. - ХПИ, - 1983, - №29, - С. 85-91.

39. Яценко В.К., Костенко Н.А. Критерии оценки поверхностного упрочнения деталей машин. // Проблемы прочности. - 1985. - №3. - С.23-26.
40. Яценко В.К., Асатурян А.Ш. Критерии оценки алмазного выглаживания деталей ГТД. // Авиац. пром-сть. - 1986. - №5. - С. 17-19.
41. Яценко В.К., Кичаев Ю.П. Критерии оценки коэффициента упрочнения деталей машин. // Пробл. прочности. - 1989. - №3. - С. 62-65.
42. Яценко В.К., Думанская В.А. Модель коэффициента упрочнения деталей ГТД. // Авиац. пром-сть. - 1991. - №10. - С.13-16.
43. Яценко В.К. Расчет коэффициента упрочнения деталей ГТД параметрами в ультразвуковом поле. // Пробл. прочности. - 1991. - №8. - С. 78-81.
44. Boguslaev U.A., Yatsenko U.K. The methods of resistance for the low-carbons steels fatigue failure. // Fracture mechanics: successes and problems. - Collection of Abstracts. - Part II. - Lviv, 1993. - p. 480-481.
45. А.с. 870093. М.Кл. В24 В39/02. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки. /Л.И. Ивченко, В.П. Чупров, В.К. Яценко и др. Опубл. 1981. Бюл. №37.
46. А.с. 1301673. В24 С 1/00. Способ абразивоструйной обработки внутренних поверхностей деталей. /В.И. Благовещенский, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко и др. Опубл. 1987. Бюл. №13.
47. А.с. 14437201. В 24 С 1/10. Способ дробеструйной обработки поверхностей деталей. /В.И. Благовещенский, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко. Опубл. 1988. Бюл. №42.
48. А.с. 1466914. В 24 В 39/02. Устройство для обработки внутренних торцовых поверхностей корпусных деталей. /В.Ф. Притченко, В.К. Яценко, Л.С. Ривкин и др. Опубл. 1989. Бюл. №11.
49. А.с. 1122187. С 01 М 7/00, С 01 Н 3/30. Установка для динамических испытаний образцов и деталей машин. /С.Б. Михайлов, В.Г. Михайлов, В.К. Яценко и др. Опубл. 1984. Бюл. №42.
50. А.с. 1460636. С 01 М 7/00, С 01 Н 3/30. Установка для дина-

мических испытаний. /В.К. Яценко, С.Б. Михайлов, В.Ф. Притченко. Оpubл. 1989. Бюл. N7.

51. А.с. 1741008. G 01 N 3/08. Способ испытания на прочность элемента обода лопаточного диска турбомашин. /А.Г. Сахно, В.К. Яценко, В.И. Благовещенский и др. Оpubл. 1992. Бюл. N22.

Yatsenko V.K. Forecasting and technological provision with carrying ability of energetic installations parts. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.02.01. engineering materials in machine building Zaporozhye State Technical University, Zaporozhye, 1996

Presented are 130 published articles, 10 certificates of patented inventions where methodological and theoretical developments are presented, their experimental tests on improving the carrying ability of the most loaded parts of energetic installations were realised with methods of surface plastic deformation. Conformity with experimental and calculated results was shown.

Яценко В.К. Прогнозування та технологічне забезпечення несучої здатності деталей енергетичних установок. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 - матеріалознавство в машинобудуванні, Запорізький державний технічний університет, Запоріжжя, 1996.

Захищається 130 наукових праць, 10 авторських свідоцтв на винаходи, які містять методичні та теоретичні розробки і їхню експериментальну перевірку по підвищенню несучої здатності найбільш навантажених деталей енергетичних установок методами поверхневого пластичного деформування. Показано відповідність експериментальних розрахункових результатів.

Ключові слова:

критерій, довговічність, концентрація, циклічне навантаження, втомна тріщина, модель, газотурбінний двигун.



AB32.P48

038567

Вопросы теории и практики
 проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин
 Вопросы теории и практики проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин

Вопросы теории и практики проектирования машин

Подписано к печати 03.07.96г. Заказ №701, Тираж 100 экз.
 Запорожье, ЗГТУ, Типография, ул. Жуковского, 64.