

На правах рукописи

Букатый Алексей Станиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ  
УПРОЧНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД НА ОСНОВЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ  
НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов  
и аппаратуры

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара – 2009

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов  
государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва» (СГАУ)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Павлов Валентин Фёдорович

Официальные оппоненты –

доктор технических наук, профессор  
Смирнов Геннадий Владиславович

кандидат физико-математических наук, доцент  
Саушкин Михаил Николаевич

Ведущая организация –

ОАО «Самарское конструкторское бюро машиностроения» (г. Самара).

Защита состоится «13» ноября 2009г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при СГАУ по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34а, 132 ауд.

Автореферат разослан «09» октября 2009 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Д.Л. Скуратов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для повышения надёжности и увеличения ресурса ГТД широко используются различные способы упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Но наряду с увеличением сопротивления усталости, остаточные напряжения (ОН), возникающие в поверхностном слое деталей, приводят к изменениям их размеров и формы – технологическим остаточным деформациям (ТОД). Особенно важно обеспечение геометрической точности для тонкостенных и маложёстких деталей, которые преобладают в конструкциях ГТД. В настоящее время большинство работ, посвящённых исследованию ТОД, основаны на аналитических методах и подходах, которые для деталей сложной конфигурации становятся малоэффективными. Поэтому разработка корректных расчётных методов прогнозирования ТОД и назначения режимов упрочнения, обеспечивающих геометрическую точность деталей в пределах допусков, является актуальной задачей в производстве газотурбинных установок и двигателей.

Определение ОН, лежащих в основе прогнозирования ТОД, является сложным и трудоёмким процессом, который до настоящего времени на большинстве предприятий осуществляется на морально и физически устаревшем оборудовании. Поскольку от точности определения ОН зависит точность прогнозирования ТОД и назначение режимов упрочнения, то автоматизация и повышение точности определения ОН также имеет большое значение и актуальность.

**Цель работы.** Разработать метод проектирования операций упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД, обеспечивающий заданные требования по точности и по уровню предела выносливости.

Главными задачами исследования являлись:

- разработка энергетического подхода к выбору режимов поверхностного упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей, обеспечивающего геометрическую точность деталей в пределах допусков;
- разработка на основе аналитического и численного – конечно-элементного методов эффективных методик прогнозирования ТОД для деталей ГТД сложной конфигурации;
- сравнение и корректный анализ разработанных и известных расчётных методик прогнозирования ТОД, разработка рекомендаций по их применению для выбора рациональных режимов упрочняющей обработки;
- разработка автоматизированной системы, обеспечивающей повышенную точность определения ОН.

**Научная новизна.**

1. Впервые применён энергетический подход к назначению режимов упрочнения, основанный на энергии поверхностного пластически деформированного слоя деталей.

2. Впервые предложена методика определения рациональных режимов упрочнения деталей, обеспечивающая заданные требования по точности и по уровню предела выносливости.

3. Предложено понятие эквивалентного начального напряжения, существенно упрощающее расчётное прогнозирование ТОД.

4. Разработана эффективная методика конечно-элементного моделирования поверхностного пластически деформированного слоя и расчёта ТОД на основе эквивалентного начального напряжения.

**Достоверность результатов работы подтверждается:**

- корректным применением аналитического и конечно-элементного методов моделирования;
- результатами сравнительных и тестовых расчётно-экспериментальных исследований;
- результатами сравнительных испытаний на образцах, вырезанных из натурных деталей;
- результатами апробации разработанных методик в производственных условиях.

**Практическая ценность работы.** Разработанные в диссертации методики обеспечивают назначение достаточно точных и эффективных режимов упрочнения тонкостенных деталей ГТД, а также позволяют существенно упростить и снизить трудоёмкость расчётного прогнозирования ТОД. Разработанная система АСБ - 1, наряду с существенным повышением точности, обеспечивает автоматизацию сложного и трудоёмкого процесса определения ОН в образцах простой и сложной формы, вырезаемых из деталей ГТД.

**Реализация результатов работы.** Результаты, полученные в работе, внедрены в производство на ОАО «НПО «Сатурн» в виде: методик учёта ОН при анализе напряжённого деформированного состояния (НДС) деталей ГТД после упрочняющей обработки; инструкций по упрочнению деталей ГТД на роботизированных установках Vapor Blast - 130 Wet и Vapor Blast RSPA - 2, а также использовались при проведении опытных работ по определению и внедрению в производство режимов упрочнения деталей двигателей ГТД SAM 146, ГТД 55 и ГТД 117.

**Апробация работы.** Результаты выполненных исследований докладывались: на Международной школе-конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений» им. П.А. Соловьева и В.Н. Кондратьева (г. Рыбинск, 2006 г); Международной н.-т. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения (г. Самара, 2006 г); Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «IX Королёвские чтения» (г, Самара, 2007 г); Всероссийской н.-т. конф. с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2008 г); Международной н.-практ. конференция «Инновация–2008» (г. Ташкент, 2008 г); 7-й Международной конференция «Авиация и космонавтика-2008» (г. Москва, 2008 г); 6-й Международной н.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. С-Петербург, 2008 г); XXXVIII Уральском семинаре по механике и процессам управления (г. Миасс, 2008 г); 6-й Международной н.-т. конф. «Проблемы исследования и проектирования машин» (г. Пенза, 2008 г); Международной н.-т. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2009 г).

Содержание работы докладывалось и обсуждалось на научно-технических семинарах и заседаниях кафедры сопротивления материалов СГАУ в 2008 и 2009 г.г.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 22 работы, в том числе в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых Высшей аттестационной комиссией – 2.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников, приложений. Содержит 134 страницы машинописного текста, включая 52 рисунка, 14 таблиц, 10 приложений и библиографию из 118 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, характеризуется объект исследования, излагается цель диссертационной работы и перечень положений, которые выносятся на защиту.

В **первой главе** приведён краткий обзор литературы по теме диссертации. Анализ литературы показал, что несмотря на большое количество работ, посвящённых упрочнению деталей методами поверхностного пластического деформирования (ППД), вопросы назначения режимов упрочнения для тонкостенных деталей разработаны недостаточно. Подходы, основанные на аналитических методах прогнозирования ТОД, основаны на значительных упрощениях и становятся в ряде случаев малоэффективными для деталей сложной формы. В таких случаях предпочтительнее метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время большое распространение получают специализированные программные средства моделирования и расчёта деталей сложной формы. Однако вопросы корректного использования ОН, локализованных в тонком поверхностном пластически деформированном слое детали, детально не проработаны.

Во всех случаях режимы упрочнения назначают на основе ОН. Однако, как показал поиск, существующие приборы ПИОН и т.п. морально устарели и имеют недостаточную точность, производство современных и доступных приборов для определения ОН отсутствует.

На основе выполненного анализа сформулированы цель работы и задачи исследования.

Во **второй главе** изложены общие принципы и подходы к определению рациональных режимов поверхностного упрочнения. Из закона сохранения энергии следует, что энергия упругой деформации деталей  $U_d$  (т.е. энергия ТОД) связана с энергией  $U_a$  поверхностного слоя  $a$ , пластически деформированного в процессе упрочняющей обработки:

$$U_d = \Delta U_a = f(U_a) \quad (1)$$

Очевидно, что энергия  $U_a$  обусловлена необратимыми изменениями линейных размеров в материале (пластические деформации, структурно-фазовые превращения и др.), называемыми первоначальными деформациями (ПД). Однако, в силу отсутствия достаточно точных методов определения ПД, на практике для определения  $U_a$  удобнее пользоваться понятием условных начальных напряжений (НН)  $\sigma_n$ . В процессе деформирования детали НН перераспределяются и при достижении состояния равновесия становятся остаточными. Вели-

чину НН предложено определять на основе ОН методом последовательных приближений:

$$\sigma_{н,i}(\xi) = \sigma_{ост}(\xi) + f_{p,i-1}(\xi) \cdot \int_0^{a_{i-1}} \sigma_{н,i-1}(\xi) d\xi, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

где при  $i = 1$   $i-1 = 0$  и следует принять  $\sigma_{н,0}(\xi) = \sigma_{ост}(\xi)$ ; разгрузочные функции  $f_p$  для кольцевых и плоских образцов соответственно:

$$f_p = \frac{1}{h}, \quad f_p(\xi) = \frac{3(h - 2\xi) \cdot (h - 2\xi_c) + h^2}{h^3}, \quad \text{где} \quad \xi_c \approx \frac{\int_0^a \sigma_{ост} \xi d\xi}{\int_0^a \sigma_{ост} d\xi}, \quad (3)$$

$h$  – толщина кольца в радиальном направлении.

На основе выражений (2–3) разработана программа расчёта НН. Расчёты показывают, что количество необходимых приближений существенно зависит от отношения  $a/h$ . Если величина  $a/h < 0,05$ , то с точностью до 3 – 5 % различием между ОН и НН можно пренебречь.

Решение задачи определения рациональных режимов упрочнения состоит из трёх этапов. На первом этапе определяют необходимые остаточные и соответствующие им НН, которые требуется создать в поверхностном слое упрочняемой детали для обеспечения наибольшего повышения предела выносливости. На втором этапе осуществляют прогнозирование возможных ТОД, обусловленных НН. Если ТОД превышают технологические допуски, то на основе расчётных методик подбирают такие величины НН и зоны упрочнения, которые обеспечивали бы необходимую геометрическую точность детали. На третьем этапе определяют параметры режимов упрочнения  $\lambda_i$ , обеспечивающие в поверхностном слое детали требуемые НН. Для реализации первого и третьего этапов предварительно проводят экспериментальные исследования связи параметров  $\lambda_i$  с величиной НН и пределом выносливости, которые определяют на образцах или опытных деталях.

Для наиболее распространённого в настоящее время дробеструйного способа упрочнения микрошариками основным управляемым параметром является давление энергоносителя  $p$ . Остальные параметры обусловлены размерами и геометрией упрочняемых деталей и регламентированы исходя из конструкции установок, либо являются взаимозависимыми.

Дробеударные способы упрочнения создают в направлениях осей  $X$  и  $Y$  (рис. 1) одинаковое пластическое деформирование поверхностного слоя, следовательно  $\sigma_x = \sigma_y$ . Поскольку метод удаления поверхностных слоёв позволяет определять только совокупность ОН  $\sigma_{ост} = (\sigma_x - \mu\sigma_y)$ ,  $\sigma_z = 0$ , по которым на основе (2–3) определим  $\sigma_n = (\sigma_{nx} - \mu\sigma_{ny})$ , то, учитывая, что при ППД возникают сжимающие ОН и НН, можно принять

$$\sigma_{nx} = \sigma_{ny} = \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\sigma_n}{1 - \mu}, \quad \sigma_1 = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные НН,  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала.

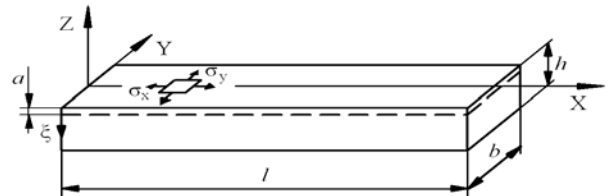


Рис. 1. Ориентация системы координат и направления ОН

Тогда выражение для удельной поверхностной энергии деформированного поверхностного слоя примет вид:

$$U_0 = \int_0^a u_0 d\xi = \frac{1}{(1-\mu)E_0} \int_0^a \sigma_H^2 d\xi, \quad (5)$$

где  $u_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]$ .

Следовательно, параметры режимов упрочнения  $\lambda_i$  можно связывать с величиной и глубиной залегания НН через  $U_0$ , от которой зависят ТОД. В этом случае становится возможным пренебречь характером распределения НН по толщине слоя  $a$ . Это существенно упрощает расчёты ТОД, т.к. фактическое распределение НН можно заменить некоторыми постоянными по толщине слоя  $a$  эквивалентными напряжениями  $\sigma_s = const$ , величину которых найдём из соотношений

$$U_0 = \frac{1}{(1-\mu) \cdot E_0} \int_0^a \sigma_H^2 d\xi = \frac{1}{(1-\mu) \cdot E_0} \int_0^a \sigma_s^2 d\xi = \frac{\sigma_s^2 \cdot a}{(1-\mu) \cdot E}. \quad (6)$$

Отсюда получаем

$$\sigma_{s1} = \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_H^2 d\xi}. \quad (7)$$

Выражение (7) удобно для расчёта ТОД стержневых и кольцевых деталей с недеформируемым поперечным сечением. В общем случае для деталей сложной формы требуются обе составляющие эквивалентных напряжений. В этом случае, разделяя компоненты  $\sigma_{Hx}$ ,  $\sigma_{Hy}$  и аналогичным образом выражая удельную поверхностную энергию через эквивалентные напряжения, получим

$$\sigma_{s2} = \frac{1}{1-\mu} \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_H^2 d\xi}. \quad (8)$$

Таким образом, величина  $U_0$  может служить универсальным критерием для перехода от режимов упрочнения к ТОД. Особенно удобным становится применение  $U_0$  в задачах, где равномерная обработка упрочнением по всей поверхности детали вызывает недопустимые ТОД. В этом случае на эффективном режиме обрабатывают наиболее ответственные и опасные участки поверхности (например, наиболее нагруженные участки или зоны концентрации напряжений). В зависимости от возникающих при этом ТОД остальная поверхность, подлежащая упрочняющей обработке, обрабатывается на пониженном или повышенном (для исправления геометрии) относительно основного режимах. Решение принимают на основе предварительного расчётного анализа ТОД.

Для определения оптимальной величины давления рабочей среды (воздуха или рабочей жидкости) были проведены экспериментальные исследования на опытных образцах. Из материала ЭИ 698ВД было изготовлено 30 образцов для определения ОН после упрочнения и 36 образцов для испытаний на усталость. Упрочнение образцов осуществлялось на двух установках – гидродробеструйной установке VB-130 Wet и пневмодробеструйной установке Vapor Blast RSPA - 2. На основе результатов исследований (табл.) была получена номо-

Параметры режимов упрочнения опытных образцов

Тип и диаметр микрошариков $d_{ш}$	№ режима упрочнения	Давление энергоносителя $p$ , МПа	Средние величины характеристик		
			Толщина слоя $a$ , мм	Удельная энергия слоя $U_0 \times 10^4$ , МПа·м	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа
Не упрочненные образцы					332,89
Стекланные $\varnothing 250$ мкм	1	0,2	0,103	2,095	395,18
	2	0,3	0,122	2,736	395,37
	3	0,4	0,137	3,533	411,46
Стальные $\varnothing 315$ мкм	4	0,15	0,147	3,051	545,38
	5	0,3	0,173	3,391	562,59
	6	0,45	0,210	4,375	630,20
	7	0,6	0,232	5,003	574,80

грамма (рис. 2), в соответствии с которой задачу определения необходимых параметров эффективных режимов упрочнения решают на основе расчётной величины  $U_{0p}$  и допустимой деформации  $[\Delta_j]$ . Разработаны рекомендации по определению рациональных режимов (эффективных давлений энергоносителя  $p_{эфф}$ ) упрочнения, которые кратко представлены в виде схемы

$$\begin{aligned}
 & \sigma_{-1} \rightarrow U_{0эфф} \rightarrow \{a, \sigma_{эфф}\} \rightarrow \{ \Delta_{jэфф} \leftrightarrow \Delta_{jпред} \} \rightarrow \\
 & \rightarrow [\Delta_j] \rightarrow \sigma_{э1} \rightarrow \{ \Delta_{1,j}, U_{0,1} \} \rightarrow U_{0p} \rightarrow \{a, p_{эфф}\}
 \end{aligned}
 \quad (9)$$

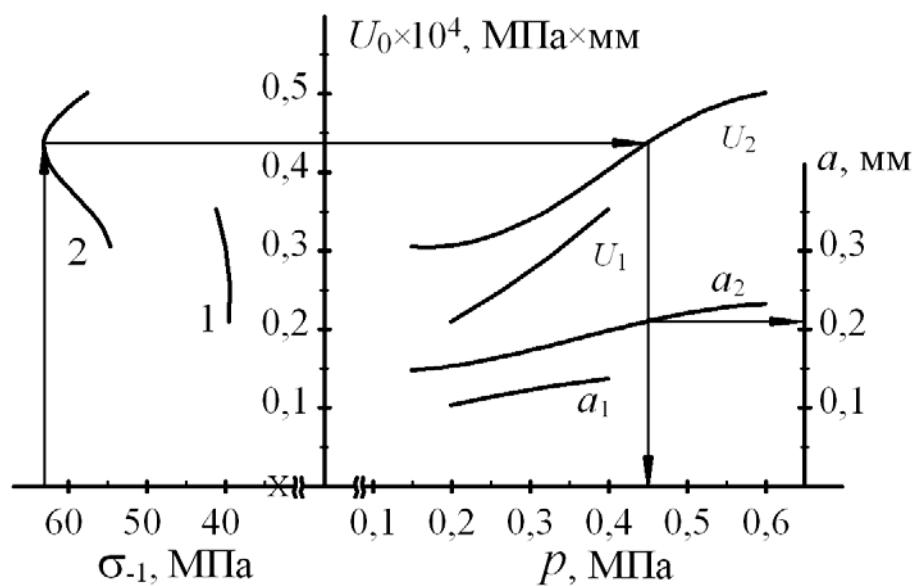


Рис. 2. Номограмма для определения давления рабочего энергоносителя:

1,  $U_1, a_1$  – зависимости  $\sigma_{-1}, U_0$  и  $a$  для стеклянных микрошариков;

2,  $U_2, a_2$  – зависимости  $\sigma_{-1}, U_0$  и  $a$  для стальных микрошариков.



В общем случае, когда остаточное напряжённое состояние (НС) неоднородно по осям  $X$  и  $Y$ , необходимо определять эквивалентные НН по отдельности

$$\sigma_{\varepsilon x} = \kappa \cdot \sigma_{\varepsilon}, \quad \sigma_{\varepsilon y} = \sigma_{\varepsilon}, \quad (10)$$

где

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{(1 - 2\mu\kappa + \kappa^2) \cdot a} \int_0^a (\sigma_{\text{НХ}}^2 + \sigma_{\text{НУ}}^2 - 2\mu\sigma_{\text{НХ}}\sigma_{\text{НУ}}) d\xi}, \quad (11)$$

$\kappa$  – коэффициент неоднородности остаточного НС.

В ряде случаев возникает необходимость в устранении недопустимых деформаций, образовавшихся в процессе изготовления детали. В этом случае нужно подбирать не только режимы упрочнения, но и место расположения и размеры участков, которые следует обрабатывать. Эта задача решается аналогично по схеме (9), где в качестве  $[\Delta_j]$  принимают величину деформаций, которые нужно устранить.

Наряду с определением  $p_{\text{эфф}}$  в работе предложена методика определения второго важного параметра режима – времени упрочнения единицы поверхности детали  $\tau_{\text{опт}}$  по величине производной от функции прогибов контрольных пластинок

$$f'(\tau) = tg\beta \approx 0,05 \cdot tg\alpha, \quad (12)$$

где  $\alpha, \beta$  – углы наклона кривой насыщения прогибов контрольных пластинок при упрочнении на начальном и конечном участках соответственно.

Тогда общее время обработки поверхности со средним диаметром  $D$  выражается следующим образом:

$$\tau = \pi \cdot D \cdot \tau_{\text{опт}} / d_{\text{я}}, \quad (13)$$

где  $d_{\text{я}}$  – диаметр участка (ядро) с эффективным упрочнением.

В **третьей главе** рассмотрены расчётные методики прогнозирования ТОД на основе аналитического метода и МКЭ в системе ANSYS.

Аналитический метод является менее трудоёмким и эффективен в тех случаях, когда упрочняемая деталь имеет простую форму и её расчётную схему с определённой погрешностью можно представить в виде типовых элементов: стержней, колец, цилиндров и кольцевых пластин. Использование эквивалентных начальных напряжений  $\sigma_{\varepsilon}$  позволило существенно упростить расчётные выражения.

Для деталей типа «стержень» удлинение и прогибы при консольной схеме закрепления

$$\Delta l = -\sigma_{\varepsilon 1} a \int_0^l \frac{S}{EF} dz, \quad f_x = \sigma_{\varepsilon 1} a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_y} \oint x ds dz, \quad f_y = \sigma_{\varepsilon 1} a \int_0^l \frac{(l-z)}{EI_x} \oint y ds dz, \quad (14)$$

где  $l$  и  $S$  – размеры в продольном и поперечном направлениях поверхности стержня, подверженной упрочняющей обработке.

Для деталей типа «кольцо» выражения для изменения диаметра и разворота поперечных сечений

$$\Delta D = -\frac{2RaS}{EF} \sigma_{\varepsilon 1}; \quad \Psi = R[(\sin \alpha + \frac{I_{xy}}{I_x} \cos \alpha) \Delta k_u - (\cos \alpha - \frac{I_{xy}}{I_x} \sin \alpha) \Delta k_v]; \quad (15)$$

где  $\Delta k_u = -\frac{a\sigma_{\varepsilon 1}}{EI_v} \oint u ds$ ,  $\Delta k_v = -\frac{a\sigma_{\varepsilon 1}}{EI_u} \oint v ds$  – изменения кривизны кольца.

Для деталей типа «цилиндр» выражения для удлинения и радиальных смещений

$$\Delta l = -\frac{la}{Eh}\sigma_{\vartheta 1}, \quad W = -\frac{Ra}{Eh}\sigma_{\vartheta 1} - \frac{M}{2k^2 D}e^{-\beta}(\cos \beta - \sin \beta), \quad (16)$$

где  $M \approx -\frac{ha}{2}\sigma_{\vartheta 2}$ ,  $\beta = kz$ ,  $k = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{Rh}}$ ,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ .

Для деталей типа «естественно закрученный стержень» упрощению подверглись выражения для силовых факторов

$$\begin{aligned} N_z &= -\sigma_{\vartheta 1} a \oint_S ds; & M_\eta &= -\sigma_{\vartheta 1} a \oint_S \xi ds; \\ M_\xi &= -\sigma_{\vartheta 1} a \oint_S \eta ds; & M_k = M_{k\sigma} &= \sigma_{\vartheta 1} a \oint_S \theta r^2 ds, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $M_{k\sigma}$  – крутящий момент от нормальных остаточных напряжений.

Конечно-элементный метод прогнозирования ТОД основан на моделировании детали и её поверхностного пластически деформированного слоя  $a$ . В настоящей работе для расчётов использовался программный пакет ANSYS 11.0, обладающий хорошо развитыми средствами и опцией импорта моделей из системы Unigraphics, что существенно облегчает разработку моделей деталей сложной формы. Основными данными, требуемыми для построения модели упрощаемой детали, являются чертежи детали, по которым осуществляется построение трёхмерной твердотельной модели, а также эпюра распределения НН по толщине поверхностного слоя  $a$ .

Разработанная методика использует команду **INISTATE**, которая позволяет загружать НН как параметр загрузки структурного анализа на первом шаге нагружения. Загрузка НН может осуществляться как в элементы, основой которых являются точки интегрирования, так и в материал. Элементы, поддерживающие послойную структуру, позволяют загружать напряжения по отдельности в каждом слое, что даёт возможность моделировать загрузку определённой эпюры напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$ . При загрузке НН в послойные элементы основой служат точки интегрирования элемента или точки интегрирования слоёв (рис. 3). В работе использовались элементы SOLID-SHELL 190 и SOLID 45, как наиболее оптимальные для создания модели детали с поверхностным слоем  $a$ .

Если поверхностный слой не является замкнутым и обрывается, например, для образца с прямоугольным сечением в направлении оси  $X$  (рис. 1), соответствующие напряжения на поверхности отсутствуют. В этом случае необходимо учесть краевой эффект – зону включения ОН, протяжённость которой можно принять равной толщине слоя  $a$ .

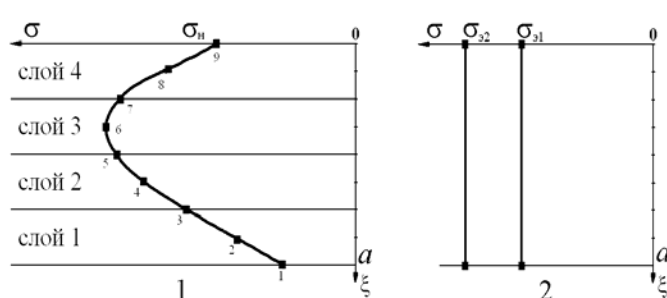


Рис. 3. Модели поверхностного слоя:  
1– загрузка эпюры НН; 2– загрузка эквивалентных НН  $\sigma_{\vartheta 1}$  и  $\sigma_{\vartheta 2}$

В этом случае необходимо учесть краевой эффект – зону включения ОН, протяжённость которой можно принять равной толщине слоя  $a$ .

На основе разработанных методик в системе Mathcad составлены программы и проведены сравнительные тестовые расчёты прогибов для деталей типа «стержень» и изменения диаметра и разворота поперечных сечений для деталей типа «кольцо». Сопоставление результатов расчётов и экспериментальных данных показали, что наиболее достоверными и рациональными следует считать расчёты по эквивалентным НН  $\sigma_{32}$  с учётом краевого эффекта.

В четвёртой главе изложены результаты реализации разработанного метода проектирования операций упрочнения на роботизированных установках фирмы RÖSLER. Необходимость упрочнения лопаток 2 ступени компрессора НД ГТД из материала ВТ 6 обусловлена отрицательными результатами испытаний на усталость при  $N_{\text{баз}} = 20 \cdot 10^6$  циклов. Упрочнение лопаток осуществлялось по режиму № 2 (табл.) на гидродробеструйной установке VB-130 Wet. Данный режим был выбран как оптимальный, т. к. обеспечивает необходимый уровень ОН, сопротивления усталости и ТОД (анализ выбранного режима упрочнения с помощью МКЭ осуществлялся в системе ANSYS). Результаты испытаний на усталость лопаток на базе  $N_{\text{баз}} = 20 \cdot 10^6$  циклов подтвердили правильность выбранного режима упрочнения.

После равномерного упрочнения диска турбины низкого давления ГТД на серийном режиме контроль выявил коробление фланца, превышающее технологические допуски  $\pm 0,08$  мм. По результатам замеров было принято решение о необходимости проведения дополнительных опытных работ по устранению ТОД, обусловленных не только тонкостенностью упрочняемых элементов, но и асимметричной формой детали. По методике, изложенной в разделе 2, был выбран режим упрочнения № 6. Процесс упрочнения был запрограммирован на роботизированной дробеструйной установке Vapor Blast RSPA – 2, что позволило осуществить точное позиционирование сопел при упрочнении всех необходимых поверхностей. Результаты повторных замеров подтвердили, что превышающие допуск ТОД были устранены.



Рис. 4. Установка для определения ОН

В пятой главе изложены описание автоматизированной системы (АС) определения ОН, основанной на использовании более совершенных датчиков перемещений и методик обработки данных и расчёта ОН для образцов сложной формы. Основу автоматизированной системы определения остаточных напряжений составляет установка для определения ОН, показанная на рис. 4. В отличие от штативной конструкции существующих приборов ПИОН, Меркулон и др. в используемой установке массивный литой корпус существенно повышает жёсткость конструкции и помехозащищённость от внешних шумов и вибраций. Модульная конст-

рукция установки позволяет легко и быстро менять оснастку для определения ОН не только в стержневых образцах, но и в образцах-кольцах, полукольцах, вырезанных из галтелей, а также в кольцевых деталях малой и большой кривизны (соответственно при  $R/h > 5$  и  $R/h < 5$ ) с произвольным поперечным сечением, например в кольцах подшипников и т.п. В состав АС входят также компьютер на базе процессора P4, лазерный принтер, блок стабилизированного питания Б5-47, приспособления для монтажа образцов и подогрева защитного покрытия, а также комплект оснастки для поверки датчиков перемещений и регулировки системы. Управляющая программа на основе последовательного интерфейса RS-485 позволяет в многозадачном режиме и реальном масштабе времени управлять работой и осуществлять сбор данных с 8–10 установок с непрерывным выводом на экран монитора деформационных кривых и эпюр ОН.

Результаты сравнительных исследований погрешности определения ОН, показанные на рис. 5, показывают существенно более высокую точность определения ОН системой АСБ – 1 ( $\Delta\sigma_{\max} = \pm 23.4$  МПа) по сравнению с существующими приборами ПИОН ( $\Delta\sigma_{\max} = \pm 62.2$  МПа).

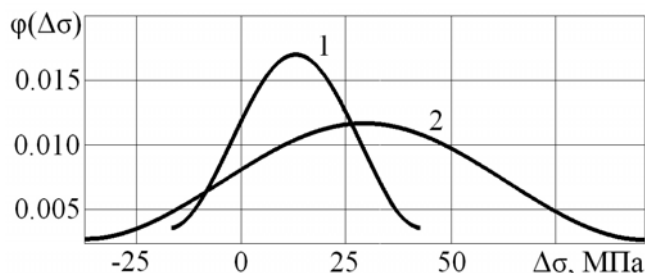


Рис. 5. Плотность вероятностей распределения погрешностей определения ОН

1 – АС АСБ-1; 2 – Установка ПИОН

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты и выводы выполненной работы приведены в **заключении** и выражаются в следующем:

1. Разработан энергетический подход к созданию методик определения режимов упрочнения поверхностным пластическим деформированием тонкостенных и маложёстких деталей ГТД.

2. На основе энергетического подхода разработан метод проектирования операций упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД, обеспечивающий заданные требования по точности и по уровню предела выносливости.

3. Разработано понятие эквивалентных начальных напряжений, позволяющее без снижения точности существенно упростить расчёты ТОД для деталей типа стержень, цилиндр и кольцо, а также являющееся основой для разработки новых методик прогнозирования ТОД.

4. На основе расчётно-экспериментальных исследований разработаны номограмма для определения основного параметра – давления рабочего энергоносителя для упрочнения деталей стальными и стеклянными микрошариками, а также уточнённая методика определения оптимальной длительности упрочнения микрошариками единицы поверхности детали.

5. На основе метода конечных элементов в системе ANSYS разработаны методики прогнозирования ТОД с использованием полной эпюры распределения НН и на основе эквивалентных НН. Показано, что использование эквива-

лентных НН значительно упрощает подготовку исходных данных и значительно уменьшает трудоёмкость расчётов по прогнозированию ТОД.

6. Проведены сравнительные расчёты с использованием остаточных, начальных и эквивалентных начальных напряжений, подтверждающие адекватность разработанных методик прогнозирования ТОД.

7. Проведена апробация в производственных условиях метода проектирования операций упрочнения на роботизированных установках фирмы RÖSLER. Реализация режимов упрочнения, определяемых по разработанной методике, обеспечивает величины ТОД в пределах допуска и подтверждает правомерность подходов, положенных в основу метода.

8. На примере определения режима дополнительного упрочнения фланцев диска турбины низкого давления показана возможность устранения недопустимых ТОД высокоточных деталей.

9. Разработана автоматизированная система определения остаточных напряжений АСБ – 1, позволяющая определять ОН в образцах сложной формы. Проведены статистические исследования точности определения ОН системой АСБ – 1. Сравнительными исследованиями установлено, что точность определения ОН системой АСБ – 1 в 2,7 раза выше по сравнению с известными приборами ПИОН, поле рассеивания составляет  $\pm 23.5$  МПа.

10. Результаты, полученные в работе, внедрены в производство на ОАО «НПО «Сатурн» в виде: методик учёта ОН при анализе НДС деталей ГТД после упрочняющей обработки; инструкций по упрочнению деталей ГТД на роботизированных установках Vapor Blast - 130 Wet и Vapor Blast RSPA - 2, а также использовались при проведении опытных работ по определению и внедрению в производство режимов упрочнения деталей двигателей ГТД SAM 146, ГТД 55 и ГТД 117.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В рецензируемых журналах из перечня ВАК:*

1. **Букатый, С. А.** Прогнозирование технологических остаточных деформаций тонкостенных дисков после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования [Текст] / С. А. Букатый, А. П. Кондратов, А. С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. – № 2(10).- Ч. 2. – Самара, 2006. – С. 91–95.

2. **Букатый, С. А.** Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах сложной формы [Текст] / С. А. Букатый, А. С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. – № 2(10).- Ч. 2. – Самара, 2006. – С. 307–310.

*В других изданиях:*

3. **Букатый, С. А.** Прогнозирование технологических остаточных деформаций тонкостенных дисков после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования [Текст] / С. А. Букатый, А. П. Кондратов, А. С. Букатый // «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» / Ма-

териалы докладов межд. н.-т. конф. 21-23 июня 2006 г. – Самара: СГАУ, 2006. – В 2-х Ч. Ч.1. – С. 183–184.

4. **Букатый, С. А.** Автоматизированная система определения остаточных напряжений в образцах сложной формы [Текст] / С. А. Букатый, А. С. Букатый // Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов межд. н.-т. конф. 21-23 июня 2006 г. – Самара: СГАУ, 2006. – В 2-х Ч. Ч.1. – С. 181–182.

5. **Букатый, С. А.** Технологические остаточные деформации тонкостенных дисков после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования [Текст] / С. А. Букатый, А. С. Букатый // Авиация и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений: Материалы Международной школы-конференции молодых учёных, аспирантов и студентов им. П.А. Соловьева и В.Н. Кондратьева. – Ч.3. – Рыбинск: РГАТА, 2006. – С. 137-140.

6. **Каранаева, О. В.** Влияние механических свойств упрочнённого слоя на перераспределение остаточных напряжений при циклическом нагружении [Текст] / О. В. Каранаева, Ю. Н. Сургутанова А. В. Чирков, А. С. Букатый // Математическое моделирование и краевые задачи: М33 Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 315-318.

7. **Букатый, А. С.** Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учётом геометрии упрочняемых деталей [Текст] / А. С. Букатый // Авиация и космонавтика 2008: Тезисы седьмой международной конференции. Тезисы докладов – Москва: МАИ, 2008. – С. 68.

8. **Букатый, А. С.** Повышение точности изготовления деталей после поверхностного упрочнения [Текст] / А. С. Букатый // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, промышленность: сборник трудов шестой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» – Санкт-Петербург, 2008. – С. 254–255.

9. **Букатый, А. С.** Обеспечение точности изготовления деталей после упрочнения поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.С. Букатый // Проблемы исследования и проектирования машин: сборник статей IV Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2008. – С. 24–26.

10. **Кирпичёв, В. А.** Оптимизация режимов упрочнения маложёстких деталей ГТД [Текст] / В. А. Кирпичёв, А. С. Букатый, В. Ю. Поленов // Математическое моделирование и краевые задачи: М33 Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 132–135.

11. **Сургутанова, Ю. Н.** Прогнозирование предела выносливости элементов конструкций, изготовленных с использованием опережающего поверхностного пластического деформирования [Текст] / Ю. Н. Сургутанова, О. В. Каранаева, В. С. Сазанов, А. С. Букатый // Математическое моделирова-

ние и краевые задачи: МЗЗ Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 315–318.

12. **Букатый, С. А.** Определение остаточных напряжений в длинномерных осесимметричных валах [Текст] / С. А. Букатый, О. И. Драчёв, Д. А. Расторгуев, А. С. Букатый // Ташкент, «Янгиасравлоди». Республика Узбекистан. Сб. научных статей Международной научно-практ. конференции «Инновация-2008», 2008. – С. 105–106.

13. **Букатый, С. А.** Автоматизированный прибор для определения остаточных напряжений [Текст] / С. А. Букатый, А. С. Букатый // Ташкент, «Янгиасравлоди». Республика Узбекистан. Сб. научных статей Международной научно-практ. конференции «Инновация-2008», 2008. – С. 275–276.

14. **Букатый, А. С.** Определение режимов упрочнения тонкостенных деталей ГТД микрошариками с учётом допускаемых деформаций [Текст] А. С. Букатый // Всероссийская молодёжная научная конференция с международным участием «IX Королёвские чтения»: тезисы докладов. – Самара: СГАУ, 2007. – С. 109.

15. **Букатый, А. С.** Повышение точности изготовления деталей после поверхностного упрочнения [Текст] А. С. Букатый // Высокие технологии в машиностроении. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической Интернет-конференции с международным участием – Самара: СамГТУ 2008. – С. 11 – 12.

16. **Букатый, С. А.** Определение рациональных режимов поверхностного упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД на основе допускаемых деформаций [Текст] С. А. Букатый, А. С. Букатый // Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития двигателестроения" 2009 – Самара: СГАУ, 2009. – в 2 Ч. – Ч. 2. – С. 23 – 25.

17. **Павлов, В. Ф.** Влияние режимов дробеструйной обработки на остаточные напряжения и предел выносливости образцов из сплава ЭИ 698 [Текст] В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, А. А. Иванов, А. С. Букатый // Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития двигателестроения" 2009 – Самара: СГАУ, 2009. В 2 Ч. Ч. 2. С. 162 – 163. – 220 С.

18. **Кирпичёв, В. А.** Моделирование упрочнённого поверхностного слоя маложёстких деталей ГТД [Текст] В. А. Кирпичёв, А. С. Букатый, В. К. Шадрин, Н. И. Яковенко // Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития двигателестроения" 2009 – Самара: СГАУ, 2009. – в 2 Ч. – Ч. 2. – С. 175 – 176.

19. **Кирпичёв, В. А.** Исследование степени наклёпа и сопротивления усталости сплава ЭИ 968 после упрочнения стеклянными и стальными микрошариками [Текст] В. А. Кирпичёв, А. А. Иванов, А. С. Букатый, О. Ю. Семёнова // Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития двигателестроения". – Самара: СГАУ, 2009. – в 2 Ч. – Ч. 2. – С. 180 – 181.

20. **Букатый, С.А.** Автоматизированная система определения остаточных напряжений [Текст] С. А. Букатый, А. С. Букатый // Механика и процессы

управления: труды XXXVIII Уральского семинара. – Т. 1. – Екатеринбург: УрО РАН, Миасс – 2008. – С. 191–194.

21. **Кирпичёв, В. А.** Конечно-элементное моделирование поверхностного слоя деталей, подвергаемых упрочнению методами поверхностного пластического деформирования [Текст] В. А. Кирпичёв, А. С. Букатый, В. К. Шадрин, Н. И. Яковенко // Математическое моделирование и краевые задачи: М33 Ч.1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2009. – С. 121 – 122.

22. **Кирпичёв, В. А.** Выбор оптимального режима пневмодробеструйной обработки по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений [Текст] В. А. Кирпичёв, А. С. Букатый, О. Ю. Семёнова, В. В. Лунин // Математическое моделирование и краевые задачи: М33. Ч.1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2009. – С. 118 – 120.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (проекты РНП.2.1.1/3397 «Разработка методов решения краевых задач, расчётно-информационная база данных и программный комплекс для оценки релаксации остаточных напряжений при ползучести и сопротивления усталости упрочнённых элементов конструкций с концентраторами напряжений» и РНП.2.1.1/889 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния диссипативных процессов на механические характеристики и разрушение материалов»).