

У Т В Е Р Ж Д А Ю



Директор ФГБУН  
Института гидродинамики СО РАН  
имени М.А. Лаврентьева  
д.ф.-м.н.

  
Васильев А.А.  
«25» февраля 2015 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации о диссертационной работе

**Смыслова Виталия Андреевича**

«Методы расчета остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**1. Актуальность темы исследований.** Повышение срока службы машин, снижение массы и стоимости их изготовления являются первоочередными задачами отечественного машиностроения, требуют научного поиска, развития экспериментальных и теоретических работ, повышения качества проработки конструкций и технических решений.

Конструктивные методы повышения прочности приводят к увеличению массы конструкций и числа комплектующих, усложнению технологии изготовления, ухудшают унификацию и стандартизацию. Поэтому основным резервом повышения долговечности деталей является применение современных видов и средств упрочняющих технологий. Среди них важную роль играет поверхностное пластическое упрочнение, в результате применения которого в приповерхностном слое изделия создаются сжимающие остаточные напряжения, позволяющие повысить, например, сопротивление усталости, трибологические характеристики и другие параметры долговечности. В связи с этим современная технологическая практика поверхностного пластического упрочнения деталей с концентраторами напряжений ставит перед фундаментальной и прикладной механикой задачи расчётного прогнозирования законов распределения в них остаточных напряжений как после процедуры упрочнения, так и в

условиях температурно-силового нагружения, когда существенную роль играет деформация ползучести и связанные с ней релаксационные процессы. Это объясняется тем, что многие эксплуатационные свойства элементов конструкций изделий энергетического и аэрокосмического промышленных комплексов, такие как износостойчивость, прочность и сопротивление усталости, в значительной степени зависят от качества поверхностного слоя, формируемого в процессе механической обработки при их изготовлении. Недостатки чисто экспериментальных и расчётно-экспериментальных методов хорошо известны: они позволяют определить либо одну, либо две компоненты остаточных напряжений, но не позволяют определить остальные компоненты напряжений и компоненты остаточных пластических деформаций. Другая составляющая чисто экспериментальных исследований: трудоёмкость, длительность и (в большинстве случаев) разрушающие методы с использованием натуральных образцов. Поэтому разрешение проблемы прогнозирования кинетики напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое элементов конструкций в полном для механики деформируемого твёрдого тела объёме возможно только на основе соответствующих математических моделей, в рамках которых только и возможно ответить на подобные запросы теоретической науки, технологической практики и инженерных методов оценки надёжности эксплуатирующихся упрочнённых деталей.

Поскольку разработка расчётных методов напряжённо-деформированного состояния в упрочнённых конструкциях, включая его моделирование после процедуры упрочнения и в процессе высокотемпературной ползучести материала, находится в рамках одного из основных фундаментальных направлений современной механики, то выбор темы исследований для диссертации, безусловно, является актуальным как с теоретической, так и с прикладной точек зрения.

**2. Основные результаты и научная новизна.** Оценку научной новизны и основных результатов исследований выполним по главам.

Прежде чем сформулировать основные цели и задачи диссертационной работы, в **первой главе** соискатель учёной степени выявил принципиальные сложности экспериментального и теоретического подходов в исследуемой научной проблеме, порождающие неоднозначность в принимаемых гипотезах и,

как следствие этого, многообразие в подходах при моделировании напряжённо-деформированного состояния упрочнённых деталей, в том числе – с концентраторами напряжений, в условиях многоциклового нагружения и ползучести. На основе анализа существующих моделей, их достоинств и недостатков, объясняется предпочтение автора в выборе конкретных моделей его исследований и структурировании диссертации. Несмотря на то, что данная глава является, по существу, вводной, автор достаточно подробно изложил основные положения проблематики, указал место принимаемых гипотез с их обсуждением, что существенно расширяет изложение цитируемых статей. Полагаем, что такой подход следует отнести к достоинствам работы, поскольку это существенно упрощает понимание многих вопросов при знакомстве с ней.

Во **второй главе** диссертации приводятся постановки и решение новых краевых задач расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в полом цилиндрическом образце после процедуры анизотропного упрочнения, научно-обоснованно вводится ряд гипотез и ограничений, позволяющих в рамках выбранного феноменологического подхода корректно решить, по существу, обратную краевую задачу. Указанные подходы разработаны на основе обобщения уже имеющихся и опубликованных соответствующих методов для сплошного цилиндрического образца, однако постановка задач для областей с двухсвязными границами (полый цилиндр) существенно отличается от задач для областей с односвязными границами (сплошной цилиндр). К новым результатам данной главы следует отнести введение параметра анизотропии поверхностного пластического упрочнения, что позволило теоретически обосновать экспериментально наблюдаемое расслоение диаграмм остаточных окружных и осевых напряжений в полых цилиндрических образцах, которое возникает для ряда технологий: обкатка роликом, алмазное выглаживание, дорнование и другие. Следует отметить, что предложенная обобщённая методика определения НДС в упрочнённом слое полого цилиндрического образца в частном случае включает в себя процедуры так называемого изотропного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, термопластическое упрочнение, азотирование) при значении параметра анизотропии  $\alpha=1$ , когда эпюры окружных и осевых остаточных напряжений практически совпадают.

Диссертант выполнил экспериментальную проверку методики расчета НДС в упрочненном слое полого образца как в условиях изотропного, так и анизотропного упрочнения для сталей 45 и 40Х и получил конкретные значения параметра анизотропии упрочнения для технологии обкаткой роликом, которые изменяются от 6,6 до 16,2. Аналогичные исследования по экспериментальной проверке выполнены и для сплошных цилиндрических образцов.

Одним из положительных моментов данной главы является выполненная классификация промышленно существующих упрочняющих технологий и рекомендации по выбору гипотезы изотропного или анизотропного упрочнения при решении соответствующих краевых задач для полых цилиндрических образцов (табл. 2.1 диссертации) и сплошных образцов (табл. 2.2 диссертации).

С точки зрения механики деформируемого твёрдого тела результаты второй главы имеют важное значение при решении краевых задач с начальным напряжённо-деформированным состоянием в условиях внешнего нагружения первоначально упрочнённых цилиндрических конструкций.

Одной из проблем при теоретическом исследовании процесса релаксации в условиях ползучести является отсутствие методики влияния чисто температурного нагружения на поля остаточных напряжений, сформированных после процедуры упрочнения. В **третьей главе** соискатель впервые обратил на это внимание и установил, что за счет изменения модуля Юнга материала происходит существенное перераспределение остаточных напряжений (вследствие температурного нагрева), для оценки которых он разработал оригинальный метод, сводящий термоупругую задачу к задаче фиктивной ползучести. Результаты численной реализации этой методики подтвердили, что происходит существенное перераспределение остаточных напряжений при температурном нагреве цилиндрической детали.

Результаты, полученные во второй и третьей главах, нашли логическое продолжение в **четвертой главе**, где решён класс краевых задач, связанных с оценкой релаксации остаточных напряжений в упрочнённом полом и сплошном цилиндрическом образце вследствие деформации ползучести в условиях температурно-силового нагружений. Диссертантом предложен новый подход, основанный на непосредственном численном решении возникающих краевых задач. В качестве исходного (первоначального) напряжённо-

деформированного состояния используется состояние, возникающее в цилиндре после процедуры поверхностного пластического деформирования и последующего температурного нагружения. Далее осуществляется численное решение краевой задачи о ползучести растягиваемого стержня с заданными начальными нелинейными полями остаточных напряжений и пластических деформаций, наведённых в процессе упрочнения детали.

Логическим завершением этой части работы является экспериментальная проверка методов решения краевых задач о релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрических образцах при ползучести. Для полых образцов адекватность метода установлена с использованием экспериментальных данных других авторов в условиях термоэкспозиции, а для сплошных образцов – на основании собственных экспериментальных исследований применительно к образцам из сплава ЖСБКП при одноосном растяжении при  $T = 800^{\circ}\text{C}$ , которые в определенной мере закрывают остающийся открытым в научной литературе вопрос экспериментальной проверки процесса релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести. Отметим следующие элементы научной новизны третьей главы. Во-первых, соискатель впервые учитывает трансформацию полей остаточных напряжений при чисто температурной нагрузке (разгрузке); во-вторых, краевые задачи формирования и релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести решены в самом общем виде с учетом анизотропного процесса упрочнения; в-третьих, впервые выполнен цикл экспериментальных исследований по влиянию растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести; в-четвертых, теоретически и экспериментально установлены «неклассические» эффекты замедления скорости релаксации остаточных напряжений в условиях одноосного растяжения по сравнению с вариантом чисто температурных выдержек без нагрузки.

К положительным моментам **пятой главы** следует отнести разработку специализированного программного комплекса, позволяющего решать рассмотренные в диссертации задачи механики упрочненных конструкций в условиях ползучести, поскольку соответствующее программное обеспечение в научной практике отсутствует.

Все отмеченные выше элементы новизны диссертационной работы полностью соответствуют специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

**3. Теоретическая и практическая ценность работы.** Оценивая результаты диссертации в целом, следует признать, что в ней впервые получены точные решения краевых задач (в рамках принятых математических ограничений) формирования остаточных напряжений после процедуры анизотропного упрочнения и релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести для полого цилиндрического образца; выполнен ряд новых теоретических и экспериментальных исследований по влиянию температурных выдержек и растягивающих нагрузок на процесс релаксации остаточных напряжений и создан автоматизированный программный комплекс, аналогов которого в настоящее время не имеется. Несомненно, что эти результаты существенно обобщают существующие подходы и являются определённым продвижением в разделе механики деформируемого твёрдого тела – механике упрочнённых конструкций.

С другой стороны, с точки зрения внешней логической завершенности диссертационной работы (её связи со смежными науками и производством), очевидно, что полученные в ней результаты имеют ясные пути использования в современной теории и практике обработки деталей в режиме упрочняющих технологий. Диссертантом убедительно продемонстрировано, что с прикладной (инженерной) точки зрения разработанные методы, во-первых, позволяют решить ряд важных прикладных задач для упрочнённых цилиндрических элементов конструкций, а, во-вторых, могут служить методической основой для разработки методик оценки надёжности упрочнённых деталей в энергетической и аэрокосмической отраслях промышленности.

**4. Достоверность** результатов диссертации сомнений не вызывает. Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом целей. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок «физических» и математических задач; апробированностью использованных математических методов их решения; применением классических подходов механики деформируемого твёрдого тела с использованием хорошо известных вычислительных процедур; апроби-

рованностью используемых методов экспериментального исследования упругих деталей; экспериментальной проверкой используемых гипотез и решений задач. В некоторых частных случаях полученные результаты сопоставляются с известными экспериментальными результатами других авторов.

**5. Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в научных журналах (в том числе, в 4 статьях в журналах из перечня ВАК) и трудах конференций различного статуса, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня. Частично результаты работы прошли серьёзную научную экспертизу при выполнении НИР по двум проектам Министерства образования и науки РФ и грантам РФФИ. Поэтому считаем, что работа Смыслова В.А. в достаточной мере опубликована и апробирована.

**6. Диссертация и автореферат** написаны ясным, понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно и подробно раскрывает постановку, методы и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат, в целом, отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

**7. Рекомендации по использованию результатов диссертации.** Полученные в диссертации решения и связанные с этим выводы, касающиеся особенностей постановок задач и разработанных методов их решения, несомненно, найдут свое практическое использование при планировании технологических упрочняющих обработок и эксплуатации упрочнённых деталей в условиях высокотемпературного силового нагружения. Рекомендуем использовать результаты диссертации в исследовательских институтах и конструкторских бюро, занимающихся разработкой упрочняющих технологий и их реальной эффективности в условиях эксплуатации, например, в авиастроении, энергетическом машиностроении, нефтехимии.

Конкретно, использование результатов диссертации рекомендуется продолжить в:

- 1) Институте машиноведения РАН (г. Москва);
- 2) Институте гидродинамики СО РАН (г. Новосибирск);
- 3) Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре);

- 4) Самарском государственном аэрокосмическом университете;
- 5) Самарском государственном техническом университете;
- 6) Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь);
- 7) Пермском национальном исследовательском политехническом университете;
- 8) ОАО «Кузнецов» (г. Самара) и других организациях.

**8. Замечания по содержанию и оформлению работы.** Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. По существу и оформлению работы можно сделать следующие замечания.

1. Диссертант в главе 4 формулой (4.7) вводит принцип суперпозиции начальных напряжений  $\sigma_z^{res}(r)$ , возникших после процедуры упрочнения, с «рабочими» напряжениями  $\sigma_{z0}$ , возникающими после приложения растягивающих нагрузок. Поскольку в целом краевая задача нелинейная, то возникает вопрос корректности использования принципа суперпозиции для напряженных состояний.

2. При постановке задач вводится ряд гипотез и предположений относительно характеристик напряженно-деформированного состояния после процедуры упрочнения и в процессе ползучести. Ключевыми предположениями являются пренебрежение касательными напряжениями и волевое решение о гипотезе (2.8) вида  $q_z = \alpha q_\theta$  ( $\alpha = const$ ) для полых и сплошных упрочненных цилиндрических образцов. Из диссертации не ясно, имелись ли какие-либо экспериментальные обоснования для введения этих гипотез?

3. В пункте 4.4. использованы феноменологические температурные аппроксимации параметров реологической модели для сплавов Д16Т и В95, при этом для параметров  $c, b_k, \alpha_1$  использован экспоненциальный характер зависимости от температуры, а для показателей нелинейности  $m_1, n_2$  и  $m_\alpha$  – линейная зависимость. Внятного объяснения выбора функций таких классов в диссертации не имеется. А при температурной аппроксимации модуля Юнга тип аппроксимирующей функции вообще не указан.

4. В использованной реологической модели параметр поврежденности введен неклассическим способом и связывает истинное ( $\sigma$ ) и номинальное ( $\sigma_0$ )



напряжения формулой  $\sigma = \sigma_0(1 + \omega)$ , в отличие от классического представления Ю.Н. Работнова  $\sigma = \frac{\sigma_0}{(1 - \omega)}$  ( $0 \leq \omega \leq 1$ ). Тем самым затруднено понимание «физического» смысла параметра поврежденности, поскольку не указаны границы изменения этого параметра в основных моделях (4.27)–(4.33) и (4.36)–(4.45).

5. Касаемо оформления диссертации, то, во-первых, нужно указать на достаточно большой для кандидатской диссертации объем первой (обзорной) главы диссертации, которая составляет почти 30%. Во-вторых, в диссертации такого объема не могло не быть стилистических, математических и других неточностей, хотя и в крайне ограниченном количестве. Так, на стр. 117 диссертации вместо  $T = 125$  должно быть  $T = 125^\circ \text{C}$ , в формуле (4.61) диссертации вместо формулы  $p_{ij}^0 = \frac{3}{2} cS^{m-1} \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{kk} \sigma_{ij} \right)$  должно быть  $p_{ij}^0 = \frac{3}{2} cS^{m-1} \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right)$ ; имеется незначительное количество опечаток; в пунктах 4.2 и 4.3 (формулы (4.22) и (4.33)) одним и тем же символом  $\alpha$  обозначены разные величины; в библиографии публикации 50-60 годов можно было и не использовать, поскольку имеются более поздние монографии, которые включают результаты этих работ.

6. В автореферате диссертации при описании глав 3 и 4 следовало бы коротко сформулировать постановки задач, хотя по мере ознакомления с полным текстом автореферата о каких задачах идет речь становится понятно.

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коем случае не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Смыслова В.А.

**9. Заключение по диссертации.** Диссертантом решена актуальная научная проблема в области разработки методов решения краевых задач для упругих элементов конструкций в условиях ползучести. Полученные результаты достоверны, имеют важное научное и прикладное значение, выводы и умозаключения обоснованы.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа В.А. Смыслова «Методы расчета остаточных напряжений в упругих цилиндрических образцах при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести» является завершенным научным исследованием, выполненным самостоятельно на высоком научно-методическом уровне, соответствует спе-

специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела» и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор – Виталий Андреевич Смыслов – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв составили:

Зав. лабораторией статической прочности  
д.ф.-м.н , профессор

И.Ю. Цвелодуб

Ведущий научный сотрудник  
д.ф.-м.н , профессор

Ю.М. Волчков

Отзыв рассмотрен и утверждён на научном семинаре отдела механики деформируемого твердого тела Института гидродинамики СО РАН от 9 февраля 2015 г. (протокол заседания № 4).

Заведующий отделом МДТТ ИГиЛ СО РАН  
Советник РАН, академик

Б.Д. Аннин