

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.»
(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»,
доктор химических наук, профессор

ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054

Телефоны: (8452) 99-88-11;

факс (8452) 99-88-10;

(8452) 99-86-03; факс (8452) 99-86-04

E-mail: sstu_office@sstu.ru

Остроумов И.Г.

« 23 » 10 2023 г.

23.10.2023 № 04/22-3694

На № _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Деревянка Екатерины Евгеньевны

на тему «Методы расчёта релаксации остаточных напряжений
в поверхностно упрочнённых статически неопределимых стержневых
конструкциях в условиях ползучести»,
представленную в диссертационный совет 99.2.059.02, созданный на базе
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и
ФБГОУ ВО «Воронежский государственный университет», к защите
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твёрдого тела

1. Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором изложена общая характеристика работы, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы из 169 наименований. Содержит 201 страницу текста, включая 43 рисунка, 10 таблиц и два приложения. По объёму и структуре работа соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» к оформлению диссертаций. Изложение диссертационной работы соответствует заявленной теме и подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность. Развитие методов повышения ресурса деталей машин и элементов конструкций в условиях нормальных и повышенных температур, совершенствование методик расчёта напряжённо-деформированного состояния в условиях ползучести с учётом влияния начального напряжённого состояния на кинетику деформирования конструкции в условиях внешнего температурно-силового нагружения, минимизация материалоёмкости, соответствие геометрических размеров и формы деталей нормативным требованиям являются основными проблемами современного машиностроительного и аэрокосмического комплексов. Наряду с созданием новых материалов, оптимизацией элементов конструкций за счёт конструкторских решений важное место в решении проблемы увеличения ресурса деталей машин играют технологические процедуры, одной из которых является поверхностное пластическое деформирование. Это ставит перед теоретической наукой ряд новых задач, основными из которых являются моделирование начального напряжённо-деформированного состояния после поверхностного пластического деформирования и расчёт релаксации наведённого остаточного напряжённого состояния в условиях высокотемпературной ползучести. Из хорошо выполненного обзора диссертации и анализа имеющихся научных публикаций можно сделать вывод о том, что проблема разработки методов решения краевых задач для поверхностно упрочнённых конструкций в условиях ползучести находится в стадии становления и развития, работ в этом направлении незначительное количество как в отечественных, так и в зарубежных журналах. Собственно исследования соискателя ориентированы на решение новых конкретных краевых задач в рамках вышесформулированной проблемы для статически неопределимых систем с поверхностно упрочнёнными элементами. Решение таких задач отсутствует в научной литературе, поэтому тематика диссертационной работы Деревянка Е.Е. является актуальной.

3. Основные результаты и научная новизна. При оценке научной новизны результатов исследований нужно исходить из того, что настоящая диссертационная работа выполнена в рамках Научной Школы, сложившейся в Самарском государственном техническом университете. Поэтому соискателем сделан определённый шаг в области математического моделирования формирования остаточных напряжений после поверхностного упрочнения и их релаксации в условиях ползучести, что является одним из научных направлений этой Школы.

Отметим полученные научные результаты, обладающие новизной, по главам.

1. К положительным моментам следует отнести систематический анализ работ предшественников, подробное изложение экспериментальных исследований, имеющихся методов моделирования остаточного напряжённо-деформированного состояния после упрочнения, описания использованной в дальнейшем реологической модели, что, во-первых, способствует лучшему восприятию материала остальных глав диссертации, а во-вторых, даёт чёткое понимание личного вклада соискателя в полученные результаты в главах 2-4.

2. В главе 2 в самом общем виде разработана математическая модель и алгоритм численного расчёта эволюции остаточных напряжений в условиях ползучести в упрочнённых стержневых элементах статически неопределимых систем. Получены новые результаты релаксации остаточных напряжений при решении модельной задачи для систем с одной степенью свободы с цилиндрическими стержневыми элементами из сплава Д16Т при температуре $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отметим здесь полученный оригинальный результат, заключающийся в том, что при чисто температурном нагружении компоненты остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических стержнях системы претерпевают ступенчатое изменение не только за счёт температурных деформаций, но и за счёт изменения модуля Юнга вследствие прогрева до температуры «эксплуатации». Это ранее не отмечалось для стержневых систем.

Заслуживает внимания апостериорный анализ сходимости и устойчивости численного метода на основе сравнительного анализа расчётных (численных) данных и предельных (асимптотических) значений характеристик напряжённого состояния в элементах стержневой системы на стадии установившейся ползучести, полученных аналитически. Здесь получено хорошее соответствие расчётных (на больших временных интервалах $t = 500$ ч) и предельных аналитических значений при $t \rightarrow \infty$ (таблицы 2.1 и 2.2 в диссертации), что можно считать частичной проверкой адекватности разработанного численного метода.

3. Существенно значимые результаты получены в главе 3 на примере систем из одного поверхностно упрочнённого сплошного (одностороннее упрочнение) цилиндрического стержня и полого цилиндра (упрочнение внутренней и внешней поверхности) в условиях осевой нагрузки, кручения и внутреннего давления (для полого цилиндра) и жёстких ограничениях на осевые и угловые перемещения после силового воздействия при высокотемпературной ползучести. Здесь предложен ряд новых постановок краевых задач, разработаны алгоритмы и численные методы их решения для всевозможных комбинаций первоначально приложенных осевых усилий, крутящего момента и внутреннего давления. В этой главе получены новые данные по релаксации остаточных напряжений для сплошного цилиндрического образца из сплава ЖС6КП при четырёх температурах, которые имеют не только самостоятельный интерес, но и важны с точки зрения практики, поскольку этот сплав в рассмотренном температурном диапазоне широко используется в авиадвигателестроении. Из фундаментальных результатов следует отметить полученный эффект замедления процесса релаксации остаточных напряжений при наличии кинематических ограничений по сравнению со случаем их отсутствия.

Новая краевая задача с наличием кинематических ограничений решена и для полого двусторонне упрочнённого цилиндрического образца на примере тонкостенных трубок из стали 08X18H9 при $T = 600$ °С, получены

новые данные по релаксации остаточных напряжений при сложных комбинациях первоначально приложенных внешних нагрузок (осевое растяжение, кручение, внутреннее давление), а также отмечено, что и в этом случае наличие кинематических ограничений сказывается на процесс релаксации остаточных напряжений – наблюдается уменьшение её скорости по сравнению со случаем отсутствия кинематических ограничений.

4. Заслуживает внимания и разработанный программный комплекс для реализации разработанных математических моделей релаксации остаточных напряжений для рассмотренных в диссертации стержневых элементов конструкций. Важность результатов четвёртой главы заключается в эксклюзивности разработанных алгоритмов и их программной реализации, поскольку в настоящее время во множественных коммерческих вычислительных пакетах отсутствуют модули решения рассмотренных в диссертации задач. И если для задачи формирования остаточных напряжений после упрочнения имеются некоторые успешные попытки, то задачи релаксации остаточных напряжений решить при помощи десятков известных программных продуктов невозможно, поскольку специализированные расчётные модули в известных программных комплексах отсутствуют. Поэтому результаты четвёртой главы также обладают определённой новизной.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют, что поставленная в диссертационном исследовании цель выполнена Деревянка Е.Е. в полном объёме.

4. Достоверность результатов. Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом цели и задач. Достоверность используемых экспериментальных данных обосновывается тем, что они заимствованы из надёжных публикаций в рецензируемых журналах высокого уровня. Теоретические результаты базируются на корректном использовании положений механики деформируемого твёрдого тела в области ползучести

материалов, корректном использовании теории дифференциальных уравнений, сопоставлении расчётных и экспериментальных данных после поверхностного пластического деформирования, сравнением численных данных расчётов на стадии установившейся ползучести при больших временах с асимптотическими полями напряжений, полученными аналитически.

5. Теоретическая и практическая ценность. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с теоретической точки зрения диссертантом сделан определённый шаг в направлении решения новых краевых задач для поверхностно упрочнённых элементов конструкций стержневого типа с кинематическими ограничениями для оценки релаксации остаточных напряжений при ползучести, которые, с одной стороны, вносят определённый вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твёрдого тела, а с другой стороны, полученные результаты имеют самостоятельное значение, например, для оценки эффективности поверхностного упрочнения деталей, эксплуатирующихся при высоких температурах. С точки зрения прикладного характера полученных результатов, очевидно, что они имеют понятные пути использования, в первую очередь, в авиадвигателестроении, поскольку материал поверхностно упрочнённых элементов конструкций газотурбинных двигателей испытывает во многих случаях такие режимы термомеханического нагружения, которые и рассмотрены в диссертационной работе, а также в машиностроительной промышленности, на железнодорожном транспорте и других отраслях. Об этом напрямую свидетельствует акт о внедрении некоторых результатов исследования в расчётную конструкторскую практику ОКБ ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), специализирующегося на проектировании и серийном производстве авиадвигателей.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы Деревянка Е.Е. в достаточном объёме опубликованы в научных журналах (в

том числе, в требуемом минимуме журналов из перечня ВАК Минобрнауки), включая публикации в изданиях из базы данных Scopus и Web of Science, и трудах конференций различного статуса, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня, перечень которых достаточно внушительный. Полностью работа докладывалась на ряде профильных семинаров в ведущих университетах и выполнялась в рамках двух проектов РФФИ. Считаем, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

7. Диссертация и автореферат написаны понятным научным языком с корректным использованием научной и технической терминологии. Содержание диссертации подробно и в полном объёме раскрывает постановку, экспериментальные и расчётные методы и результаты решения поставленных задач. Автореферат отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата соответствует существующим требованиям.

8. Соответствие паспорту научной специальности.

Рассматриваемая диссертация соответствует как минимум трём основным областям исследования специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твёрдого тела» по следующим направлениям:

1. Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости (п. 3).
2. Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях (п. 11).
3. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела (п. 12).

9. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение основные результаты и выводы работы, в диссертации не выявлено. Тем не менее, имеется ряд замечаний по диссертационной работе Деревянка Е.Е.

1. В диссертации при рассмотрении трёхстержневой системы (рис. 2.2, в автореферате рис. 1) ошибочно указывается, что её степень статической неопределимости 2, а на самом деле она равна 1.

2. Во всех рассмотренных задачах для расчёта релаксации остаточные напряжения в поверхностно упрочнённых элементах конструкций кроме радиуса зависят ещё от температуры. Почему в расчётную методику не привлекалось уравнение теплопроводности, а прогрев предполагался мгновенным и равномерным по продольной координате?

3. В главе 4 нет логически строгого обоснования выбора в качестве языка программирования Python. В чём, собственно, его преимущество при разработке соответствующих алгоритмов и реализации программного обеспечения для рассмотренного класса задач?

4. Автор использует экспериментальные данные для остаточных напряжений, заимствованные из независимых источников. Но напряжения экспериментально измерить невозможно. Поэтому в тексте диссертации в соответствующих местах нужно было описать метод их определения, поскольку на самом деле они рассчитываются по измеренным деформационным характеристикам (разных в зависимости от используемого метода).

5. В работе использованы разнообразные численные методы при решении краевых задач формирования и релаксации остаточных напряжений. Однако оценки погрешностей методов не приведены, например, для модели (2.22)-(2.27); модели (3.46); модели, изложенной в пункте 4.1.2, и других. Адекватность разработанных численных методов выполнена сравнением данных расчёта по предложенным моделям с расчётами в асимптотическом приближении на стадии установившейся ползучести, но наряду с этим желательно было бы подтвердить адекватность ещё и экспериментальным способом.

6. Укажем на некоторые замечания по тексту диссертации. Непонятен физический смысл величины ε_z^0 в формуле (1.5) на стр. 28 диссертации. На стр. 6 пункты 1 и 2 задач исследования близки по смыслу, их можно было бы объединить. Некорректен текст в пункте 3 на стр. 91, который можно понять буквально так, что кинематические ограничения возникают вследствие нагружения, тогда как речь идёт об ограничениях, накладываемых на осевую и угловую компоненты вектора перемещений после приложения нагрузок в начальный момент времени. Чётко логически не связаны исследования в главе 2 (стержневые системы) и главе 3 (сплошные и полые цилиндрические образцы). Имеются опечатки, например, в подрисуночных подписях к рис. 3.15 и рис. 3.16.

Несмотря на сформулированные замечания, отмеченные недостатки носят всё же частный характер и не влияют на общее положительное отношение к рецензируемой работе.

10. Рекомендации по использованию результатов работы.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на стадии проектирования в организациях машиностроительной и авиационной отраслей при расчётах на долговечность элементов конструкций в условиях малоциклового усталости при нормальных и повышенных температурах и многоосных сложных циклах нагружения, например, в АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь), ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), Пермском национальном исследовательском политехническом университете, Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королёва, Институте машиноведения РАН (г. Москва), Институте машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург), Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), ВИАМ (г. Москва), ЦИАМ (г. Москва), ПАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество», Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А., Тульском

государственном университете, Институте механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Самарском государственном техническом университете, Воронежском государственном университете и многих других научных и научно-исследовательских организациях, занимающихся родственными проблемами.

11. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаем, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Совокупность выполненных научных исследований можно классифицировать как разработку новых методов решения краевых задач механики поверхностно упрочнённых стержневых конструкций в условиях высокотемпературной ползучести при наличии кинематических ограничений на перемещения для получения новых данных о релаксации остаточных напряжений и эффективности поверхностно пластического деформирования при высоких температурах.

Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объёме полученных экспериментальных и теоретических результатов и вносит существенный вклад в решение теоретических и прикладных вопросов специальности 1.1.8 Механика деформируемого твёрдого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа Деревянка Екатерины Евгеньевны соответствует специальности 1.1.8 Механика деформируемого твёрдого тела, имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 18.03.2023 г.), а её автор – Деревянка Екатерина Евгеньевна – заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв рассмотрен и утверждён на расширенном заседании кафедры «Математика и моделирование» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» под председательством заведующего кафедрой, д.т.н., профессора Крысько В.А.

Присутствовало – 12 человек. Результаты голосования: «за» – 12 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Протокол заседания № 5 от 23 октября 2023 г.

Отзыв подготовлен:

Заведующий кафедрой «Математика
и моделирование»
федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук (01.02.04),
профессор

23 октября 2023 года



Крысько
Вадим Анатольевич

Служебный телефон:
Телефон: 8 (8452) 99-87-24
E-mail: tak@san.ru

Служебный адрес:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77
СГТУ имени Гагарина Ю.А.
Сайт: www.sstu.ru

Подпись Крысько Вадима Анатольевича заверяю,
Учёный секретарь Учёного совета
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»

«23» октября 2023 года



Потапова А.В.