



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор

ПАО «ОДК-Кузнецов»

Кандидат технических наук

П. В. Чупин

«24» октября 2023 г.

ОТЗЫВ

На автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны «Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых, статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твёрдого тела».

Необходимым условием обеспечения конкурентоспособности высоконагруженных изделий энергомашиностроительного производства и, в частности, газотурбинных двигателей является повышение надёжности и долговечности их узлов и деталей. Статистика показывает, что практически более двух третей отказов таких машин в процессе эксплуатации связано с усталостными разрушениями. С целью повышения сопротивления усталости конструкций в технике отработаны и широко используются разнообразные технологии поверхностного пластического деформирования (ППД), обеспечивающие формирование в поверхностных слоях материала оптимальных по уровню и распределению по глубине поверхностных остаточных напряжений сжатия.

Для конструкций, работающих в условиях относительно невысоких температур и статических нагрузок существует практически единое мнение о безусловной, вне зависимости от времени эксплуатации, полезности и необходимых параметрах таких технологий.

В отношении деталей, работающих в условиях повышенных температур и нагрузок, вызывающих деформации ползучести в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния (НДС), взгляды технических специалистов на необходимые параметры ППД в зависимости от времени и режимов эксплуатации и даже их полезность, зачастую существенно расходятся. Опыт, да и общефизические представления о процессах реализующихся в материале таких деталей показывает, что для этого есть определённые основания.

Учитывая крайне сложную процедуру экспериментальных исследований как процесса релаксации поверхностных остаточных напряжений в условиях ползучести при различных вариантах НДС, так и влияния его на сопротивление усталости на первый план выходят расчётные методики анализа. Поэтому представленная диссертационная работа **актуальна и востребована**.

В работе выполнен анализ релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах статически неопределимых стержневых систем общего вида и для частных случаев цилиндрических стержней при сложных внешних воздействиях и кинематических ограничениях на линейные и угловые перемещения, которые существенно влияют на процесс релаксации.

Расчёты выполнены для упрочнённых цилиндрических деталей из достаточно широко применявшихся в реальных конструкциях высокожаропрочного турбинного сплава ЖС6КП и нержавеющей стали X18H10T в условиях работы, характерных для авиационных ГТД, что представляет собой определённый **практический интерес**.

Научная новизна работы заключается в разработке новых методик расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых цилиндрических элементах стержневых систем при наличии кинематических ограничений и их реализации при сложных температурно-силовых нагружениях.

Достоверность и обоснованность выносимых на защиту положений подтверждается корректным использованием математического аппарата, известных постулатов и соотношений механики деформируемого твёрдого тела, корректных реологических моделей поведения материалов, экспериментальным подтверждением принятых моделей реализации поверхностных остаточных напряжений.

Отдельно хотелось бы отметить высокий уровень структурированности и компактности подачи материала в тексте автореферата.

Основные положения по тематике работы опубликованы в достаточном объёме **научных публикаций**, в том числе в 5 изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

В качестве недостатков можно отметить:

1. Отсутствие в автореферате информации о степени новизны разработанного соискателем программного обеспечения.
2. Отсутствие в автореферате информации о возможном развитии предложенных подходов в направлениях использования для анализа реальных упрочнённых тел более сложной формы.

Замечания не носят критического характера. Скорее всего, они являются следствием ограниченности объёма автореферата и не снижают достоинств диссертационной работы.

В целом диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполнена на актуальную тему, содержит необходимый уровень практической ценности и научной новизны, апробирована в необходимом объёме публикаций, вполне соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Деревянко Екатерина Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Эксперт ОКБ СГК ПАО «ОДК-Кузнецов»
кандидат технических наук (01.02.06)

 Е.П. Кочеров
24.10.2023

Почтовый адрес: 443009, г. Самара, Заводское шоссе, 29, ПАО «Кузнецов», тел. +7 (846) 312-60-56, e-mail: kotcherov_ep@kuznetsov-motors.ru.

Я, Кочеров Евгений Павлович, эксперт ОКБ СГК ПАО «Кузнецов» г. Самара, даю согласие на обработку персональных данных при формировании документов по защите диссертации Деревянко Е. Е.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны
«Методы расчёта релаксации остаточных напряжений
в поверхностно упрочнённых статически неопределимых
стержневых конструкциях в условиях ползучести»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твёрдого тела

Диссертационная работа Деревянка Е.Е. естественным образом развивает научное направление в области исследования релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах конструкций. В диссертации поставлен ряд новых краевых задач с различного рода кинематическими ограничениями в элементах стержневых систем и предложены методы их решения. Актуальность и востребованность работы обусловлены не только дальнейшим развитием этой тематики в теоретическом плане, но и потребностями инженерной практики в различных направлениях энергетического двигателестроения, эксплуатационные температурно-силовые нагрузки в которых вызывают деформации ползучести и связанные с этим процессы перераспределения остаточных напряжений. Результаты работы, несомненно, обладают научной новизной и практической значимостью.

Работа подробно обсуждалась на научном семинаре кафедры «Сопротивление материалов» Самарского госуниверситета в период её подготовки к защите и все критические замечания были соискателем учтены при завершении её работы. Из анализа содержания автореферата можно указать лишь на то, что стоило более подробно описать конкретные результаты внедрения в ПАО «ОДК-Кузнецов», а также особенности и структуру разработанного не имеющего аналогов программного обеспечения.

Указанные замечания не уменьшают научной и практической значимости рассматриваемой работы. Исходя из представленных в автореферате сведений, диссертационная работа Деревянка Екатерины Евгеньевны выполнена на достаточно высоком научном уровне, посвящена решению важных научно-

Я, Павлов Валентин Фёдорович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

В. Павлов.

Павлов Валентин
Фёдорович

Подпись Гаврилова В.Ф. удостоверяю.
Начальник отдела сопровождения деятельности
научных советов Самарского университета
Бояркина Бояркина У.В.
«пятидесяти» 20 23 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет), г. Самара, Московское шоссе, д. 34.
Почтовый адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.
Телефон: +7 (846) 335-18-26, Факс: (846) 335-18-36.
Адрес электронной почты sopromat@ssau.ru
Адрес официального сайта и сети «Интернет»: <https://ssau.ru/>

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Дервянка Екатерины Евгеньевны «Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

Прочность реальных изделий, как правило, определяется состоянием их приповерхностных слоев, поврежденность которых на один-два порядка выше, чем глубинных областей. Для увеличения ресурса работы деталей используют различные методы поверхностного упрочнения, в частности метод поверхностного пластического деформирования (ППД). В последнем случае в приповерхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, уменьшающие степень его поврежденности. Однако в процессе эксплуатации эти напряжения релаксируют, что приводит к деградации прочностных свойств приповерхностного слоя. Поэтому **актуальна** проблема разработки методов расчета релаксации остаточных напряжений для оценки состояния приповерхностного слоя в изделии. В диссертации эта задача решена для статически неопределимых стержневых систем, а также для сплошных и полых, толстостенных и тонкостенных цилиндрических тел при наличии жестких кинематических ограничений на продольные смещения и углы закручивания их торцов.

Научная новизна работы заключается в разработке методов расчета релаксации напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем, а также в решении аналогичной проблемы для сплошных и полых удлиненных цилиндров при сложных режимах их термосилового нагружения и учете жестких ограничений на осевые и угловые перемещения таких элементов конструкций.

Практическая значимость диссертации подтверждается использованием ее результатов в расчетной практике профильных отделов ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара) и в учебном процессе СамГТУ для магистрантов и аспирантов.

Научная достоверность диссертационной работы подтверждается сравнением расчетных полей НДС с известными экспериментальными данными после процедуры ППД и с решениями, полученными на основе модели установившейся ползучести.

Диссертация хорошо апробирована на Всероссийских и Международных научных конференциях и семинарах. Результаты ее опубликованы в 14 научных работах, из них 5 – в журналах из перечня ВАК и баз данных Web of Science и Scopus.

Замечания по тексту автореферата диссертации.

1. Отсутствуют пояснения величин в формуле (3): μ_s , α_s , q_{rs} , p_{rs} , p_{0s} и p_{zs} .
2. На стр. 12 сказано, что частично известна экспериментальная зависимость $\sigma_\theta^{res}(r)$, а на стр. 14 – $\sigma_z^{res}(r)$. Какое же из остаточных напряжений $\sigma_\theta^{res}(r)$ или $\sigma_z^{res}(r)$ известно из эксперимента, если речь идет об одном и том же цилиндрическом элементе?
3. В конце стр. 10 говорится о «направлении вектора φ », но φ – это угол, а не вектор (см. рис. 1).

Сделанные замечания не снижают в целом положительного впечатления от представленной диссертационной работы. Судя по автореферату, диссертация Е.Е. Деревянка «Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

Янковский Андрей Петрович; д.ф.-м.н., специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; ведущий научный сотрудник лаборатории «Физики быстропротекающих процессов»; Российская федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1; тел. (383) 330-39-23; e-mail: yankovsky_ap@rambler.ru; сайт ИТПМ: www: itam.nsc.ru.

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны.

31.10.2023



ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны
«Методы расчёта релаксации остаточных напряжений
в поверхностно упрочнённых статически неопределимых
стержневых конструкциях в условиях ползучести»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твёрдого тела**

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности математического моделирования релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах конструкций стержневых систем в условиях высокотемпературной ползучести при кинематических ограничениях на компоненты вектора перемещений. Отсутствие исследований в этом направлении в мировой научной практике подтверждает новизну в постановках задач и методах их решений.

В диссертации рассмотрены вопросы разработки методологии математического моделирования эволюции остаточного напряжённо-деформированного состояния после поверхностного упрочнения элементов статически неопределимых стержневых систем достаточно общего вида и в частных случаях единичных сплошных и полых цилиндрических стержней при заданных ограничениях на линейные и угловые перемещения при ползучести и сложных программах внешнего нагружения. Впервые предложен и реализован численно-аналитический метод решения такого рода задач, приведены результаты, подтверждающие правильность исходных посылок и выводов автора.

Рассмотренные задачи, несомненно, представляют интерес как с точки зрения разработки новых моделей и методов, так и приложений к конкретным задачам промышленности. В связи с вышеизложенным, представленная диссертационная работа является актуальной и имеет теоретическое и практическое значение.

Автором диссертационного исследования проделана большая работа по анализу современного состояния исследований по данной тематике. Для численного моделирования построенных математических моделей созданы численно-аналитические методы и на их основе алгоритмы и комплексы программ задач реконструкции и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых стержневых элементах конструкций. Проведён большой численный эксперимент, подтверждающий адекватность предложенного подхода.

Результаты диссертационного исследования основаны на использовании строгих математических методов и соответствии моделей физической сути описываемых явлений, апробированы и достаточно полно опубликованы автором в открытой печати.

Исследования проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, это подтверждает научную и практическую значимость работы.

Вопросы по автореферату:

1. Из автореферата не ясно, каким образом определялось начальное напряжённо-деформированное состояние в формулах (1), сформулированное после поверхностного пластического деформирования.

2. Рецензент рекомендовал бы автору диссертации рассмотреть более сложные пути нагревания, при этом температурное поле определять из решения соответствующего уравнения теплопроводности – это пожелание для дальнейших исследований.

3. В автореферате не приведена модель ползучести, алгоритм интегрирования определяющих соотношений ползучести с учетом разделения тензора деформации на упругую, пластическую, температурную составляющие и деформации ползучести, а также не приведена методика определения материальных параметров модели из базовых экспериментов.

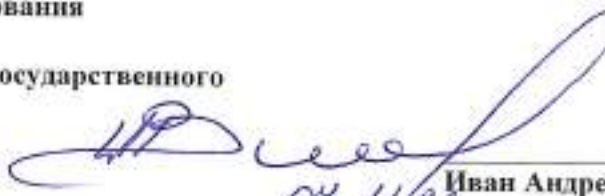
Отмеченные замечания не влияют на положительное отношение к работе.

В целом диссертация Е.Е. Деревянка является завершённой научно-квалификационной работой, выполнена на высоком научном уровне, написана грамотным языком. Основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, являются новыми. Выводы, сделанные в работе, обоснованы. Достоверность результатов подтверждена тестированием на реальных данных, апробацией и внедрением разработанных моделей, методов и программного обеспечения. Материалы диссертации опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в SCOPUS и WOS.

На основании автореферата можно сделать вывод, что представленная кандидатская диссертация Деревянка Екатерины Евгеньевны отвечает всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям. Соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твёрдого тела.

Я, Волков Иван Андреевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета и их дальнейшую обработку.

Волков Иван Андреевич,
доктор физико-математических наук (01.02.04),
профессор, главный научный сотрудник
лаборатории моделирования физико-механических процессов
Центра суперкомпьютерного моделирования
НИИ механики Национального
Исследовательского Нижегородского государственного
Университета им. Н.И. Лобачевского


04.11.23 Иван Андреевич
Волков

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского», 603022, г. Нижний Новгород, пр-кт Гагарина, 23 корп. 6 (Научно-
исследовательский институт механики НИГУ им. Н.И. Лобачевского)
Тел.: 8(952)470-65-01

Email: pmptmvgavt@yandex.ru

Подпись И.А. Волкова заверяю







УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

АО «Авиаагрегат», к.т.н.,

А.А. Коптев

«02» ноября 2023 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны на тему «Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела

В диссертации разработаны методы расчёта ползучести и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении, а также исследовано напряжённо-деформированное состояние в упрочнённых элементах статически неопределимых стержневых системах с различной степенью статической неопределимости под действием температурно-силового нагружения. Актуальность работы не вызывает сомнений.

Необходимо отметить, что научной новизной диссертационной работы является разработанный метод расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых сплошных и полых цилиндрических образцах в условиях высокотемпературной ползучести для сложных режимов нагружения, включающих термоэкспозицию, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинация, и жёстких кинематических ограничений на угловые и осевые линейные перемещения на модельном примере тонких цилиндрических трубок из нержавеющей стали 08X18H9. Показано, что при всех рассмотренных режимах нагружения происходит практически полная релаксация остаточных напряжений в течение 50 часов, а наличие кинематических ограничений приводит к замедлению скорости релаксации по отношению к трубкам без кинематических ограничений.

Автором разработан и реализован метод решения задачи для оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённых элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении. Этот метод позволяет учитывать анизотропию пластической деформации и характер распределения остаточных напряжений после упрочнения. Выполнена

частичная проверка адекватности разработанного математического метода для стержневых систем с упрочнёнными и неупрочнёнными элементами в условиях установившейся ползучести. Получено хорошее соответствие расчётных (на больших временных интервалах) и предельных асимптотических значений.

В то же время необходимо отметить замечания:

1. В работе указано, что для нахождения значений реологических компонент деформаций ползучести можно использовать любую теорию ползучести, адекватно описывающую экспериментальные данные. Однако не приведены результаты проверки этого утверждения и не указано, проводилась ли эта проверка.

2. В работе приведены результаты расчётов применительно к продуктопроводам, однако отсутствуют результаты исследований при использовании результатов работы для деталей авиационного назначения, работающих при повышенных температурах, в частности, применительно к производству АО «Кузнецов», на котором осуществлялось внедрение результатов работы.

Указанные выше замечания не умаляют ценность работы и не являются принципиальными по отношению к её главным выводам.

В целом по объёму выполненных исследований, актуальности и научной новизне, по практическому значению и завершённости работа полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям, а её автор Деревянка Екатерина Евгеньевна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твёрдого тела.

Сообщаем своё согласие на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку наших персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны.

Отзыв подготовили:

Кандидат техн. наук (специальность 01.02.04)
Ведущий инженер лаборатории технологических проблем
АО «Авиаагрегат», 443009, Россия, г. Самара, Заводское шоссе, 55
Раб. тел. +7 (846) 207-50-38
Адрес эл. почты: valentine-lunin@yandex.ru

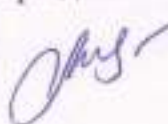
 Лунин В.В.

Доктор техн. наук (специальность 01.02.06)
Начальник лаборатории технологических проблем
АО «Авиаагрегат», 443009, Россия, г. Самара, Заводское шоссе, 55
Раб. тел. +7 (846) 207-13-73
Адрес эл. почты: bukaty@inbox.ru

 Букатый А.С.

Подписи Букатого А.С. и Лунина В.В. подтверждаю.

Начальник отдела кадрового администрирования

 Леонтьева С.П.



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянки Екатерины Евгеньевны
«Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно
упрочнённых статически неопределимых стержневых конструкциях
в условиях ползучести», представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Задачи определения остаточных напряжений различного технологического происхождения, описания их трансформаций при эксплуатационных термо-силовых воздействиях и выяснения роли в формировании ресурсных возможностей деталей ответственного назначения являются важными и актуальными. В этой связи результаты диссертации Деревянки Е. Е. по прогнозированию остаточного напряженно-деформированного состояния после поверхностной пластической деформации и последующей релаксации остаточных напряжений в элементах статически неопределимых стержневых конструкций интересны и значимы в научном и практическом плане.

Автором разработан и реализован общий подход к описанию полных картин распределения полей рабочих и остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя сплошных и полых цилиндрических стержней с течением времени, соответствующих разным этапам сложного температурно-силового нагружения и разгрузки в условиях высокотемпературной ползучести и жёстких кинематических ограничений на перемещения статически-неопределимой стержневой системы.

Разработаны оригинальные алгоритмы и программное обеспечение для расчёта кинетики напряжений на всех стадиях жизненного цикла рассматриваемых элементов конструкций — от реконструкции на основе ограниченного набора экспериментальных данных начальной системы технологических остаточных напряжений, полученной в ходе изготовления изделий, до прогноза их текущего напряженно-деформированного состояния, формирующегося под действием рабочих нагрузок и температур к заданному моменту времени.

Такой основательный подход позволил диссертанту получить целый ряд новых научных результатов, связанных с анализом роли и влияния вида напряженного состояния, температуры и условий закрепления на скорость релаксации остаточных напряжений и картины их распределения в поверхностно упрочненных элементах стержневых статически неопределимых систем.

Работа представляет собой законченное исследование, с единым подходом к проблеме. Диссертация отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела, а её автор, Деревянка Екатерина Евгеньевна, заслуживает присуждения ей указанной ученой степени.

доктор технических наук (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела), доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов Волгоградского государственного технического университета



Захаров Игорь Николаевич

Россия, 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолГТУ»), www.vstu.ru, тел.(8442) 24-81-37, E-mail: sopromat@vstu.ru.

Я, Захаров Игорь Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Деревянки Екатерины Евгеньевны, и их дальнейшую обработку.

02.11.2023 г.



Захаров И. Н.
02 ноября 2023
Проф. Захаров И. Н.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны
«Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в
поверхностно упрочнённых статически неопределимых стержневых
конструкциях в условиях ползучести», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация Е.Е. Деревянка посвящена теоретическому изучению закономерностей релаксации остаточных напряжений в статически неопределимых стержневых конструкциях, содержащих поверхностно упрочнённые сплошные и полые элементы, в том числе трубы тонкостенных продуктопроводов, при ползучести в условиях нагрева и силовых воздействий.

Особенностью объекта исследования является наличие жестких кинематических ограничений на перемещения, приводящих к статической неопределимости конструкции, что приводит к перераспределению напряжений при ползучести и существенно изменяет поле остаточных напряжений во времени. Практическая потребность в расчёте подобных конструкций и недостаточная исследованность их поведения при ползучести делает тему исследования **актуальной**.

Научная новизна диссертации состоит в разработке метода решения задачи о нестационарном напряжённо-деформированном состоянии статически неопределимых конструкций с поверхностно упрочнёнными элементами из материалов с анизотропной пластичностью, оценке влияния кинематических ограничений на скорость релаксации напряжений, разработке комплекса алгоритмов и программного обеспечения. Наиболее существенным новым результатом представляется разработка прикладного метода расчёта релаксации остаточных напряжений при высокотемпературной ползучести конструкций, подверженных термомеханическому нагружению со сложным режимом.

Практическая значимость работы заключается в применимости полученных результатов для оценки прочности деталей машин и оборудования после изготовления по технологиям, включающим поверхностное пластическое деформирование.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием апробированных постановок задач теории упругости, пластичности и ползучести, современных вычислительных методов механики деформируемого твёрдого тела, и подтверждается согласованием полученных решений с асимптотическими оценками и известными экспериментальными данными.

По автореферату необходимо высказать **замечание**: не указан источник экспериментальных данных на рис. 3, что оставляет неясным, использовались ли данные известных экспериментов, либо работа содержит также собственные экспериментальные исследования автора.

Сделанное замечание не снижает научной значимости полученных теоретических результатов. Работа, несомненно, заслуживает положительной оценки. Диссертация Е.Е. Деревянка «Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести» содержит новое решение актуальной научной задачи расчёта релаксации остаточных напряжений в статически неопределимых конструкциях с поверхностно упрочнёнными деталями при сложных термосиловых воздействиях, отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и соответствует специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Автор диссертации, Деревянка Е.Е., заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Каледин Валерий Олегович,
доктор технических наук (01.02.06 – Динамика,
прочность машин, приборов и аппаратуры),
профессор,
заведующий научно-исследовательской лабораторией
математического моделирования
Кузбасского гуманитарно-педагогического института
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Кемеровский государственный университет»,
Россия, 654041, Кемеровская обл., г. Новокузнецк,
ул. Циолковского, д. 23
тел. (+7) 923-460-6343
e-mail: vkaled@mail.ru

13.11.2023 

Подтверждаю согласие на включение в аттестационное дело и обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянка Е.Е.

Подпись профессора Каледина В.О. удостоверяю.

Начальник кадровой службы



Е.А. Гардер

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянко Е.Е. «Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела

Поверхностное упрочнение металлоизделий является неотъемлемой составляющей их производства в целом ряде промышленных технологий. Эта технологическая операция во всех ее разновидностях (импульсная термомеханическая обработка, дробеструйка, автофретирование и др.) оказывается, как правило, нестабильной. Режимы проведения данной операции приходится всякий раз устанавливать посредством специальных регламентируемых испытаний при смене в геометрии упрочняемых поверхностей, материалов изделий и даже материалов одной номенклатуры, но разной поставки. Формируемые в процессе операции поверхностного упрочнения уровни и распределения остаточных напряжений в приповерхностных слоях металлических деталей иначе оказываются недопустимо различными и могут не обеспечивать требуемые параметры по глубине упрочненного слоя и достигнутому уровню остаточных напряжений. Неоднозначность в расчетах формируемого распределения остаточных напряжений связана с выбором законов упрочнения в пластическом деформировании. Существенными оказываются при этом как изотропное, так и трансляционное упрочнение.

Для задач, составивших предмет обсуждаемой диссертации, сформированное в процессе операции поверхностного упрочнения поле остаточных напряжений, является начальным условием последующих расчетов изменений в уровне и распределении таких напряжений. Это поле в диссертации считается изначально известным (задаваемым). Гипотетическое задание уровня и распределения остаточных напряжений именно в качестве начальных условий основано на способе, предложенном ранее в работе В.П. Радченко и М.Н. Саушкина (2013; ссылка приведена в автореферате). Остаточные напряжения в приповерхностном слое материала являются следствием тщательной обработки массива экспериментальных

данных. Установление этих начальных условий, впрочем, не входит в число задач диссертации. Однако именно подобные вопросы следуют со стороны технологической практики. Надеюсь, что в процессе защиты эти вопросы найдут свое должное освящение.

Поверхностное преднапряженное состояние создано за счет пластических свойств материала. Отчего этим свойством отказано проявляться в эксплуатационных условиях? Возможны ли повторные (обратные) пластические течения в условиях эксплуатации? Почему только ползучесть ответственна за падение в уровне остаточных напряжений? Эти и подобные вопросы носят характер постановочных и обязаны иметь ответы и в автореферате и в процессе публичной защиты диссертации.

Целью диссертации является стремление предложить методы расчетов эволюции остаточных приповерхностных напряжений в деталях конструкций после помещения их в эксплуатационные условия. В качестве изделий выбраны сплошные и полые стержни, составляющие статически неопределимую стержневую конструкцию; в качестве рабочих условия принимаются термомеханические усилия в стержневой системе, вызываемые внешним воздействием. Конструктивные особенности стержневой системы задают ограничения на кинематику перемещений в процессе релаксации остаточных напряжений, на температурные граничные условия. Учет этих ограничений в диссертации предпринимается впервые в механике деформируемых тел, что заставило соискателя впервые поставить и решить принципиально новые задачи теории необратимого деформирования. Считаю, что в этом состоит основное достижение обсуждаемой работы, открывающей новое направление в механике деформируемых тел и конструкций. Разработка и развитие предложенного подхода вместе с предложениями по методам расчетов эволюции остаточных напряжений безусловно составляют предмет диссертации, заслуживающий самой высокой оценки и не оставляющей места для сомнений в должной квалификации автора.

По моему убеждению диссертационный совет имеет все основания присудить соискателю искомую ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела. Диссер-

тационная работа соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842) ВАК РФ.

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны.

ОТЗЫВ СОСТАВИЛ:

Член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 - механика деформируемого твёрдого тела), профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии (ИМиМ ДВО РАН) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: 681005 г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, д.1

тел./факс: +7 4217 549539

e-mail: mail@imim.ru

Дата составления отзыва 13.11.2023 г.



Буренин Анатолий Александрович

Подпись Буренина А.А. заверяю

Директор ИМиМ ДВО РАН

М.П.



О.Н. Комаров



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянко Екатерины Евгеньевны
«МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В
ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ
СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Представленная диссертационная работа направлена на изучение способов повышения ресурса изделий с использованием методов поверхностного пластического деформирования, что является актуальным направлением исследований при создании ответственных элементов конструкций, в том числе авиационных двигателей. Повышение прочностных характеристик металлов и сплавов в этом случае достигается за счет создания в приповерхностном слое материала поля остаточных сжимающих напряжений. Практический интерес исследований в этой области определяется тем, что методы поверхностного пластического деформирования являются штатной технологической операцией при изготовлении ответственных деталей. Однако при температурно-силовом нагружении упрочненных деталей в процессе эксплуатации и возникновении деформаций ползучести происходит релаксация наведенных остаточных напряжений. При этом актуальной является задача развития методов решения задач ползучести для упрочненных конструкций с жесткими кинематическими ограничениями, например, на угловые и осевые линейные перемещения в элементах стержневых систем, которая ранее не была рассмотрена.

В автореферате сформулированы основные положения, касающиеся цели, задач, выносимых на защиту положений, научной новизны, теоретической и практической значимости исследования, степень достоверности и обоснованности выносимых на защиту положений, выводов и рекомендаций, отмечен личный вклад автора, раскрыта структура диссертационной работы, приведены сведения о публикациях автора. Проведен анализ современного состояния исследований в области существующих методов расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненных конструкциях в условиях ползучести. Проведен анализ известных экспериментальных, расчетно-экспериментальных, феноменологических подходов к определению остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях после поверхностного пластического деформирования. В результате аналитического обзора сформулированы основные задачи и направления диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, списка публикаций. В автореферате приведена информация о содержании работы. В первой главе приведен обзор литературных источников, посвященных описанию формирования в деталях остаточных напряжений, оказывающих влияние на механическое поведение материалов, возникающих после технологических операций, анализу методов определения остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях и анализу методов релаксации остаточных напряжений. Проведено обоснование выбора реологической модели деформирования материалов, дана характеристика современному состоянию развития теорий ползучести и длительной прочности материалов. Во второй главе описан метод решения краевой задачи ползучести и релаксации остаточных напряжений в статически неопределимых стержневых системах с различной степенью статической неопределимости. Проведена общая постановка задачи. Рассмотрены решения краевых задач релаксации остаточных напряжений в цилиндрических стержневых системах, выполнены модельные расчеты. В третьей главе приводятся результаты теоретического исследования различных режимов нагружения и параметрического анализа влияния внешних нагрузок и кинематических ограничений на перемещения на процессы релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрических образцах. Проведено исследование влияния температуры и кинематических ограничений для образцов различных сталей. В четвертой главе приведено описание алгоритмической реализации, используемых

численных методов и программного обеспечения для решения краевых задач ползучести и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях. Изложены алгоритмы численного решения задач расчета кинетики остаточных напряжений в рассматриваемых конструкциях. В заключении перечислены основные результаты работы и сформулированы выводы в ходе выполнения диссертационной работы.

Высокая значимость полученных в диссертации результатов подтверждается использованием результатов работы в учебном процессе Самарского государственного технического университета и в расчетной практике профильных отделов ПАО «ОДК Кузнецов».

В качестве замечаний, которые не снижают положительное впечатление от работы, можно отметить следующее:

1. Не ясно, почему в разделе «Теоретическая значимость» сказано о постановках новых краевых задач, а в разделе «Основные результаты» эти постановки не упомянуты?
2. Вызывает вопрос структура работы. Результаты численных расчетов и их анализ приведены в главе 3, а описание алгоритмов расчетов в заключительной главе.
3. Вызывает также вопрос использование автором термина «анизотропия пластических деформаций».

Диссертационная работа Деревянка Екатерины Евгеньевны на тему «Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести» является законченной научно-исследовательской работой, обладает новизной, имеет научное и практическое значение, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года, а ее автор Деревянка Екатерина Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твердого тела.

Заведующий кафедрой экспериментальной механики и конструкционного материаловедения, директор Центра экспериментальной механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», доктор физико-математических наук (01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела), профессор



Вильдеман
Валерий
Эрвинович

Подпись Вильдемана Валерия Эрвиновича.

Ученый секретарь Ученого совета ПНИПУ Макаревич В.И.

Вильдеман Валерий Эрвинович

Адрес: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 15, корпус Д, ауд. 403

Тел./факс: +7 (342) 2-391-224, 239-10-01.

E-mail: wildemann@pstu.ru



М.П.

13.11.2023 г.



Я, Вильдеман Валерий Эрвинович, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны.



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны
«Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых
статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

В диссертации Е.Е. Деревянка разрабатываются методы оценки релаксации напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях высокотемпературной ползучести. При этом учитываются не изотропное упрочнение исследуемых сплавов, полученное при поверхностном пластическом деформировании, и сложные программы нагружения элементов конструкций, сопровождающие релаксацию остаточных напряжений при высокой температуре.

Для оценки сходимости разработанного численного метода произведено сравнение расчетных и асимптотических значений напряжений и деформаций, соответствующих стадии установившейся ползучести, полученных аналитически. Численные результаты, полученные на больших временных интервалах, находятся в хорошем соответствии с асимптотическими результатами.

С помощью разработанных алгоритмов решения задач о релаксации остаточных напряжений выполнен анализ влияния кинематических ограничений на кинетику остаточных напряжений при различных режимах сложного нагружения образцов в виде тонкостенных цилиндрических трубок. Показано, что наличие кинематических ограничений приводит к замедлению скорости релаксации.

Актуальность диссертационной работы обусловлена потребностью развития методов решения нелинейных задач о деформировании элементов конструкций в условиях ползучести и о влиянии предварительного пластического деформирования на последующие процессы релаксации остаточных напряжений.

Практическая значимость заключается в разработке методов оценки кинетики остаточных напряжений в условиях ползучести и в решении ряда задач о релаксации остаточных напряжений в типовых элементах конструкций при сложном нагружении, в том числе с учетом кинематических ограничений.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием известных определяющих соотношений теории пластичности и теории ползучести, удовлетворительным согласованием результатов расчетов напряженно-деформированного состояния с экспериментальными данными после процедуры упрочнения, а также при больших временах процессов с асимптотическими полями напряжений, характерными для стадии установившейся ползучести.

По автореферату диссертации имеются замечания.

1. Не понятно, почему в рассмотренных примерах использованы высокие значения температур, при которых за расчетное время происходит практически полная релаксация остаточных напряжений. Если это обусловлено малым временем эксплуатации реальных элементов конструкций при выбранных температурах, то об этом нужно было написать. Иначе не понятен смысл создания остаточных напряжений.

2. При малых временах эксплуатации элементов конструкций имеют значения неустановившиеся температурные процессы, в течение которых релаксация остаточных напряжений также происходит. Скорость релаксации в начале процесса при высоких уровнях остаточных напряжений может быть достаточно велика. Однако, судя по автореферату, переходные температурные процессы в диссертации не рассматривались.
3. Автореферат напечатан очень мелким шрифтом, что затрудняет чтение.

Указанные замечания не умаляют значимости проделанной работы и полученных научных результатов.

На основании анализа содержания автореферата, основных результатов и выводов можно сделать заключение о том, что диссертация «Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 18.03.2023 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Деревянка Екатерина Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела.

Я, Леган Михаил Антонович, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянки Екатерины Евгеньевны.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории статической прочности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН),
д.т.н. по специальности 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры,
доцент

 Леган Михаил Антонович
20.11.2023

ИГиЛ СО РАН
просп. Академика Лаврентьева, д.15, г. Новосибирск, 630090
тел./факс 8 (383) 333-16-12, E-mail: igil@hydro.nsc.ru

Подпись д.т.н. Легана М.А. заверяю;
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н.



А.К. Хе
20.11.2023

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Деревяника Екатерины Евгеньевны**
«Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно
упрочнённых статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях
ползучести»,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности «1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела»

В различных отраслях промышленности процедура поверхностного пластического деформирования является штатной процедурой, требующей оценки кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) упрочненных элементов конструкции в процессе высокотемпературной ползучести при эксплуатации. В связи с этим, разработка методов расчета НДС в этих элементах является актуальной задачей.

В работе разработан и реализован метод численного решения задачи расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах статически неопределимых стержневых систем в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении, разработан метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах в условиях высокотемпературной ползучести. Кроме этого, выполнены модельные расчеты и детальное исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных сплошных и полых цилиндрических образцах, разработана и реализована методика расчета релаксации остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях упрочненных тонкостенных трубок в условиях ползучести при заданных внешних нагрузках и кинематических ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения.

Достоверность полученных результатов достигается корректной постановкой задачи, использовании известных математических методов механики. При математическом моделировании используются известные гипотезы, положения и модели механики стержней, теории ползучести.

Автореферат написан хорошим научным языком и достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Работа прошла апробацию на международных научных конференциях, по теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из которых 4 работы в профильных научных изданиях Scopus и WoS.

Судя по автореферату, диссертационная работа вполне своевременна и актуальна, а все полученные результаты являются оригинальными. Постановки задач вполне понятны и четко изложены. Разработанные в ней теоретические положения, полученные аналитические и численные результаты представляют значительный интерес не только для науки, но также и для производства.

По автореферату имеется замечание:

1. В разделе «Основные результаты и выводы» на с. 16 автореферата написано «2. Исследовано напряженно-деформированное состояние в упрочненных

элементах статически неопределимых стержневых систем с одной и двумя степенями свободы (геометрически симметричная и несимметричная системы)». Не совсем понятно, как статически неопределимые системы могут иметь положительные степени свободы (одна и две). Число степеней свободы у таких систем всегда отрицательно. Кинематической же характеристикой статически неопределимых систем является степень статической неопределимости. Возможно, здесь небольшая путаница в терминологии.

Несмотря на указанное замечание, считаем, что работа Е.Е. Деревянка удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по заявленной специальности, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Согласны на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку наших персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Деревянка Е.Е.

Зав. кафедрой «Строительная механика,
геотехника и строительные конструкции»
Белорусского государственного
университета транспорта
доктор физ.-мат. наук, профессор



Д.В. Леоненко

Профессор кафедры «Строительная механика,
геотехника и строительные конструкции»
Белорусского государственного
университета транспорта
доктор физ.-мат. наук, профессор



Э.И. Старовойтов

Подписи Э.И. Старовойтова и Д.В. Леоненко удостоверяю:

Начальник  С.И. Парантин

Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34

Леоненко Денис Владимирович, (+375 232) 95-39-38, leoden@list.ru

Старовойтов Эдуард Иванович, (+375 232) 95-39-61, edstar0@yandex.by

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Деревянка Екатерины Евгеньевны на тему «Методы расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях ползучести», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертационной работы Деревянка Е.Е., посвященной разработке методов анализа релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных статически неопределимых стержневых конструкциях в условиях высокотемпературной ползучести при сложных программах нагружения, обусловлена необходимостью описания напряженно-деформированного состояния упрочненных элементов стержневых систем в условиях ползучести.

Автором предложен новый метод расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных стержневых системах в условиях высокотемпературной ползучести, а также разработан комплекс алгоритмов и программного обеспечения для решения краевых задач релаксации остаточных напряжений. Однако в автореферате отсутствуют сведения о регистрации разработанного комплекса в государственном реестре программ для ЭВМ.

Судя по автореферату, основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 13 работах, из них 4 статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК. Основные положения диссертационной работы неоднократно докладывались на различных научных мероприятиях. Исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований.

По тексту автореферата имеются два замечания: во-первых, неясно с какой целью автор привел на английском языке библиографическое описание своих работ, изначально опубликованных в российских научных журналах на

русском языке (работы 1-4 из списка публикаций)? Во-вторых, статья под номером 3 из журнала *Mechanics of Solids* представляет собой перевод на английский язык работы под номером 5, опубликованной в журнале «Известия РАН. Механика твердого тела», то есть это одна и та же статья. Достаточно было упомянуть, что все четыре статьи, опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Таким образом, основные результаты опубликованы в четырех рецензируемых изданиях, что уже превышает требования для кандидатских диссертаций, указанных в пункте 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ».

Указанные замечания не влияют на общую высокую оценку проведенных исследований, которые безусловно выполнены на высоком научном уровне.

Учитывая новизну, теоретическую и практическую значимость проведенных исследований, считаю, что представленная к защите диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.9 положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а ее автор, Деревянка Екатерина Евгеньевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», международный научный
центр по фундаментальным исследованиям в
области естественных и строительных наук,
руководитель

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
Телефон: 4732-71-42-20
E-mail: shitikova@vmail.ru

Заверяю подпись профессора Шитиковой М.В.
Ученый секретарь

Шитикова
Марина Вячеславовна

20.11.2023



Трофимов В.П.