

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
24.2.316.03 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 10 февраля 2022 года № \_\_\_\_\_ 2

**о присуждении** Фирсову Сергею Викторовичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Одновременный учёт деформации ползучести и пластического течения в материалах, обладающих упругими, вязкими и пластическими свойствами» по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела принята к защите 6 декабря 2021 г., протокол № 5, диссертационным советом 24.2.316.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, приказ Минобрнауки России от 24 июня 2016 г. № 787/нк.

Соискатель Фирсов Сергей Викторович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» с присуждением квалификации магистра по направлению «Прикладная математика и информатика». В 2018 году окончил очную аспирантуру при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Работает в штатной должности младшего научного сотрудника Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель** – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор Буренин Анатолий Александрович, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМИМ ДВО РАН) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре.

**Официальные оппоненты:**

Ревуженко Александр Филиппович, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред, ФГБУН Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск;

Егорова Юлия Георгиевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика», ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва – в своём положительном заключении, подписанном Радаевым Юрием Николаевичем, доктором физико-математических наук, профессором, ведущим научным сотрудником лаборатории моделирования в механики деформируемого твёрдого тела ФГБУН Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН и утверждённом Якушевым Сергеем Евгеньевичем, доктором физико-математических наук, директором ФГБУН Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, указала, что диссертационная работа С.В. Фирсова является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком научном уровне. В ней присутствуют все основания для её защиты по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела, а именно: научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов, их актуальность и достоверность. Не остается сомнений в квалификации соискателя и его личном вкладе в получение и оформлении результатов исследовательской работы. Диссертация полностью соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Фирсов Сергей Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Соискатель имеет 17 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них 6 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, 3 – в изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus.

Наиболее значимые работы:

1. Firsov S. V. Creep and Plastic Flow in a Rotating Cylinder with a Rigid Inclusion / S. V. Firsov, A. N. Prokudin, A. A. Burenin // *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. — 2019. — Vol. 13, no. 4. — P. 642–652.

2. Firsov S. V. Antiplane strain of hardening elastoviscoplastic medium / S. V. Firsov, A. N. Prokudin // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. — 2018. — Vol. 11, no. 4. — P. 399–410.

3. Firsov S. V. Antiplane axisymmetric creep deformation of incompressible medium / S. V. Firsov, A. N. Prokudin // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. — 2015. — Vol. 8, no. 4. — P. 406–415.

4. Фирсов С. В. Большие деформации цилиндрического тела вращающегося с ускорением / С. В. Фирсов // *Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. — 2020. — 3 (45). — С. 202—205.

5. Фирсов С. В. Ползучесть и пластическое течение во вращающемся полом цилиндра / С. В. Фирсов, А. Н. Прокудин // *Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. — 2019. — 4 (42). — С. 46—56.

6. Фирсов С. В. Необратимые деформации вращающегося цилиндра / С. В. Фирсов // *Известия АлтГУ. Математика и механика*. — 2018. — Т. 102, № 4. — С. 114—117.

7. Прокудин А. Н. Вязкопластическое течение вращающегося полого цилиндра / А. Н. Прокудин, С. В. Фирсов // *Дальневосточный математический журнал*. — 2018. — Т. 18, № 2. — С. 242—260.

8. Прокудин А. Н. Расчёт ползучести вращающегося цилиндра со свободными концами / А. Н. Прокудин, С. В. Фирсов // *Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. — 2018. — 1 (35). — С. 63—73.

9. Прокудин А. Н. Кусочно-линейный потенциал ползучести в деформациях ползучести быстровращающегося цилиндра / А. Н. Прокудин, С. В. Фирсов, Л. В. Ковтанюк // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. — 2018. — Т. 1, № 3. — С. 101—108.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы** (все положительные, указывается основное отражение замечаний):

**Отзыв на диссертацию ведущей организации** Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук имеет основные замечания:

1. Представляется неудачным выбор в качестве параметра обезразмеривания параметра времени — времени протекания процесса. Из-за чего от времени процесса становится зависимыми и определяющий параметр ползучести в законе Нортона и коэффициент вязкости в вязком сопротивлении пластическому течению. Предпочтительней было бы для этой цели использовать параметр максимальной угловой скорости вращения. Это сделало бы результаты расчётов более наглядными.

2. Наличие разрывов в искомых параметрах при торможении упруговязкопластических границ и начале их продвижения в обратную сторону не продиктовано используемой математической моделью. В этом проявляется недостаток используемого алгоритма расчётов. И деформации, и напряжения должны быть непрерывными, что должно следовать из выполнения краевых условий на подвижной упругопластической границе.

3. Текст диссертации, оформленный в целом удовлетворительно, содержит всё же ряд опечаток. Они не затрудняют восприятие текста, но всё же они присутствуют. Так, например, на стр. 5 «...операций обработки металлов давлением (прокатка, волочение, штамповка) рассчитываются в рамках...»; стр. 6 «...малых деформациях представленно довольно много...»; стр. 19 «расчитаны изменяющиеся деформации...».

4. Есть различия в обозначениях. Например символ  $r_{rz}$  на с. 48 ранее в формуле (1.16) обозначался как  $\varphi_{ij}$ ;  $\varepsilon_{ij}^p$  на с. 114 далее в формулах обозначается как  $\varepsilon_{ij}$ .

**Отзыв на диссертацию официального оппонента Ревуженко А.Ф.** имеет основные замечания:

1) Работа явно выходит за рамки кандидатской диссертации как по объему (242 страницы текста, 244 наименования в списке литературы), так и по стилю изложения (местами этот стиль больше похож на стиль учебника или монографии).

2) В работе опечатки, описки, пропущенные запятые (стр. 5, 21, 25, 31, 44, 83, 90 и др.). Есть стилистически неудачные обороты (стр. 6, 7, 67, 81 и др.).

3) Полученные автором точные решения являются, безусловно, полезными. Они относятся к одномерному случаю и являются достаточно элементарными. Автор их роль несколько переоценивает («впервые получено...»).

4) Указание на то, что решены задачи, в которых учитывается переменность скорости вращения, торможение вращения – не совсем точны. Скорость вращения выступает везде только как параметр. Правая часть во втором уравнении (3.4), стр. 84 полагается равной нулю и рассматривается класс решений, для которых второе уравнение удовлетворяется тождественно.

5) Требование непрерывности деформаций на упругопластической границе представляется слишком жестким (стр. 68, 71). Достаточно было бы ограничиться требованием непрерывности соответствующих компонент смещений и напряжений.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента Егоровой Ю.Г.** имеет основные замечания:

1. Участок разгона вращения и временной промежуток по данным соискателя составляют незначительное время по сравнению со временем протекания всего процесса. Отчего тогда пренебрегается угловым ускорением? Ответ типа «так делают все...» заведомо не принимается. Ведь в недавней работе (Begun A.S. et al. Irreversible deformation of a rotating disk having angular acceleration / A.S. Begun, A.A. Burenin, L.V. Kovtanyuk, A.N. Prokudin // Acta Mechanica. — 2021. — Vol. 232, no. 5. — P. 1917–1931. doi:10.1007/s00707-021-02942-5) данное ускорение учитывается. Следовательно, нет непреодолимых математических трудностей.

2. В третьей главе для изучения влияния учёта ползучести на пластическое течение варьировался параметр  $t^*$  — продолжительность процесса деформирования. Однако при этом меняется и скорость накопления деформаций пластического течения. Выбор такого приёма представляется неудачным.

3. Во второй главе записана компонента тензора вращения  $r_{zr}$  со ссылкой на формулу первой главы, где компоненты обозначены через  $\varphi_{ij}$ . Отчего такая путаница в обозначениях?

4. В оформленном достаточно хорошо тексте встречаются всё же опечатки

Отзыв на автореферат **Пенькова Виктора Борисовича**, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры общей механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет» содержит замечания:

К автору диссертации возникли некоторые вопросы уточняющего характера.

1. Труба кругового сечения имеет цилиндрический профиль или допускает варьирование диаметра вдоль её оси?

2. Следует ли понимать термин «параллельный» случай изменения деформаций ползучести в пластической зоне деформируемого тела как процессы пластического деформирования и ползучести, происходящие одновременно?

Отзыв на автореферат **Сенашова Сергея Ивановича**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой информационно экономических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» не содержит замечаний.

Отзыв на автореферат **Чернышова Александра Даниловича**, доктора физико-математических наук, профессора кафедры высшей математики и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» содержит замечания:

В последнее время появилось несколько моделей для описания конечных упруго-пластических сред. Такие модели должны обладать следующими свойствами: полные, упругие и пластические деформации должны удовлетворять принципу материальной объективности. Это свойство кинематического характера означает, что при наложении на материальную частичку среды жёсткого вращения во вращающейся системе координат все указанные деформации не должны изменяться, они должны быть инвариантными. Если этот принцип конкретно не выполнять, а его никто даже и не упоминает, то сам по себе он не будет выполнен. Тогда возникает парадокс: при наложении на частичку жёсткого вращения будут появляться «деформации», которых на самом деле нет, что повлечёт появление напряжений, которых тоже нет. Но можно и не накладывать жёсткое вращение, чтобы не обнаруживать парадокс.

2) И 1-й, и 2-й законы термодинамики имеют вполне определённую математическую запись. Если о них только рассуждать, но не записывать, то и они не будут сами по себе выполняться. Отсюда тоже можно получить парадоксы энергетического характера.

Может показаться, что это слишком жесткие условия и они не выполнимы. Однако в работе Изв. РАН. Механ. Тв. тела 2000, №1, С. 120–128, такая модель упруго-пластического тела при конечных деформациях приведена. Иногда встречаются возражения против этой модели: якобы при разгрузке, которая используется при выводе модели, могут появиться вторичные пластические течения. Но при выводе определяющих уравнений в данной модели рассматривается маленькая частичка среды (микрочастица) и потому можно указать

бесчисленное множество законов разгрузки, чтобы не появлялись вторичные пластические течения при разгрузке.

Отзыв на автореферат **Радченко Владимира Павловича**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» содержит следующие замечания:

Замечаний, ставящих под сомнение основные результаты, не имеется. Можно указать лишь на некоторые стилистические аспекты изложения материала. Так, основные положения, выносимые на защиту, изложены пространно. Здесь обычно сразу формулируются результаты (постановка задачи, метод решения, результаты расчётов...), а далее указывается их новизна по сравнению с существующими методами (или они получены впервые). Здесь же непонятно (пункт 4), о каком **упрочнении** боковых поверхностей цилиндра идёт речь (в тексте автореферата далее об этом никакой информации не имеется).

Желательно было бы привести численные значения величин  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ , использованных в расчётах, что облегчило бы анализ информации на рис. 2 и рис. 3.

Отзыв на автореферат **Коробейникова Сергея Николаевича**, доктора физико-математических наук, заведующего лабораторией механики разрушения материалов и конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук содержит следующее замечание:

В качестве замечания можно отметить то, что восприятие теоретического материала диссертации затрудняется использованием индексного представления тензоров, в то время как предпочтительное использование тензоров и операций с ними основано на их прямом (безындексном) представлении.

Отзыв на автореферат **Артемова Михаила Анатольевича**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой программного обеспечения и администрирования информационных систем факультета прикладной математики, информатики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» не содержит замечаний.

Отзыв на автореферат **Багмутова Вячеслава Петровича**, доктора технических наук, профессора, академика Академии инженерных наук РФ, Заслуженного работника высшей школы РФ, профессора кафедры сопротивления материалов и **Захарова Игоря Николаевича**, доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой сопротивления

материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» содержит следующие замечания:

1. Заявленное в качестве в качестве одного из основных и выносимых на защиту результатов диссертации описание алгоритма и программного модуля расчёта кинетики необратимых деформаций, как нам показалось, не представлено должным образом в тексте диссертации. Как именно организованы: последовательность выполняемых процедур численно-аналитического расчёта; отслеживание на неподвижной сетке моментов появления и продвижения (в том числе, со сменной направления и/или механизма) возникающих областей вязкопластического течения; формирование массивов накопленных необратимых деформаций и их использование на различных этапах расчётов?

2. В работе не приведено доступного для подробного анализа методов, использованных автором при численном интегрировании систем нелинейных дифференциальных уравнений, формируемых при решении задач на каждом временном шаге расчёта — не ясны ни формы численного представления рассматриваемых уравнений и граничных условий, ни специфика дискретного описания характерных особенностей рассматриваемых задач, например, подвижных границ характерных областей обратимого и необратимого деформирования, величины промежуточных функций в законтурных точках, ограничений явной разностной схемы, её сходимости и устойчивости и др.

3. Не вполне ясными остались прикладные возможности, области применимости и примеры использования разработанных программ при решении технологических задач. Насколько общими могут считаться полученные в диссертации результаты, для каких материалов (например, с точки зрения использованных при расчётах механических характеристик) характерны приведённые закономерности развития вязкопластических деформаций? Возможен ли на данном этапе реализации предложенных в диссертации подходов развёрнутый сопоставительный и верификационный анализ расчётных результатов с аналогичными данными, полученными на основе альтернативных подходов — литературными данными, результатами вычислительных и натуральных экспериментов, аналогия с наблюдаемыми технологическими эффектами и т. д.?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются компетентными специалистами в исследуемой области, а ведущая организация широко известна достижениями работающих в ней специалистов в области науки, соответствующей тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** принципиально новые подходы к постановке и решениям задач механики деформируемых материалов, в которых на продвигающихся поверхностях меняется механизм производства необратимых деформаций с вязкого (ползучесть) на пластический (течение) или наоборот;

**получены** и проанализированы новые решения классических задач механики о конечном продавливании материала по трубе (большие деформации) и о переменном вращении валов и дисков, одновременно учитывающих упругие, вязкие и пластические свойства их материалов;

**установлены** условия возникновения, развития и торможения вязкопластических течений в исследуемых задачах, степень взаимовлияния развиваемого течения на процесс ползучести и наоборот процесса ползучести на последующее вязкопластическое течение;

**предложены** алгоритмы и программы расчётов распределений деформаций и напряжений в деформируемых материалах с отслеживанием моментов и мест возникновения вязкопластических течений, с указанием закономерностей распространения граничных поверхностей областей течения и особенностей перемены в механизмах производства необратимых деформаций на таких продвигающихся поверхностях.

#### **Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** разрешимость краевых задач теории деформирования при одновременном учёте деформаций ползучести материалов и их вязкопластического течения со сменой основополагающих механизмов производства необратимых деформаций на продвигающихся граничных поверхностях областей пластического течения;

**указаны** особенности, возникающие за счёт задания условий одномоментного изменения в определяющих законах деформирования на упруговязкопластических границах при последовательном (вязкость-пластичность и наоборот) и параллельном (ползучесть и пластичность одинаково учитываются в области течения) механизмов в производстве необратимых деформаций;

**оценена** посредством комплекса вычислительных экспериментов степень взаимозависимости в процессе деформирования и взаимовлияния вязких свойств материала (ползучесть) на его пластическое течение и наоборот.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** фундаментальные подходы теории больших деформаций материалов со сложными реологическими свойствами, теории неравновесной термодинамики, методы приближённых конечно-разностных расчётов.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**установлены** примером решения модельных задач фундаментальные основания для математического моделирования процессов интенсивного формоизменения материалов в технологических операциях холодной формовки, протекающих преимущественно в условиях медленного процесса ползучести, но не свободных от областей быстрого процесса пластического течения;

**предложены** методы и алгоритмы расчётов в качестве необходимого инструментария для расчётов в ряде технологий производства изделий за счёт необратимого деформирования заготовок с учётом кручения, формирования распределённых остаточных напряжений и указания областей в материале заготовки, где формоизменение происходило с недопустимо быстрыми скоростями.

#### **Оценка достоверности результатов выявила:**

**теория** базируется на классических подходах механики деформируемых сред с использованием положений неравновесной термодинамики. В качестве законов ползучести и пластического течения приняты степенной закон ползучести Нортон и ассоциированный с боковой поверхностью цилиндра Мизеса закон пластического течения. Подчёркивается, что последний выбор продиктован только стремлением получить конкретные численные результаты. Их имеется возможность выбрать иными, если требуется более предпочтительные законы;

**идея** продиктована планируемыми практическими предложениями и всецело базируется на классических теориях упругости, пластичности, ползучести;

**используются** для составления алгоритмов и программ расчётов только классические подходы теории разностных схем.

**Личный вклад** соискателя заключается в постановке краевых задач, выводе необходимых уравнений, разработке алгоритмов и программ расчётов, проведении всех численных расчётов, оценке и представлении результатов вычислений.

**Заключение:**

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает требованиям, установленным пунктом 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 10 февраля 2022 г. диссертационный совет 24.2.316.03 принял решение присудить Фирсову Сергею Викторовичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела за развитие теории упруговязкопластических процессов деформирования в части постановки и численного решения краевых задач теории с изменениями определяющих законов необратимого деформирования на продвигающихся границах областей вязкопластического течения.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 6 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 21, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Дмитриев Эдуард Анатольевич

Григорьева Анна Леонидовна

10 февраля 2022 года