



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»
(ДГТУ)

344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Приемная ректора т. 8(863) 273-85-25
Общий отдел т. 8(863) 273-85-11
Факс т. 8(863) 232-79-53
E-mail: reception@donstu.ru

ОКПО 02069102
ОГРН 1026103727847
ИНН/КПП 6165033136/616501001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
подготовке кадров высшей
квалификации, д.т.н., проф.


А. Н. Бескопыльный
« 23 » ноября 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донской государственный технический университет»**

Диссертационная работа Лесняк Любови Ивановны «Влияние инерционных сил на остаточные напряжения и реологию полимеров и композитов на их основе» выполнена на кафедре «Сопротивление материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет».

В период подготовки диссертации с 2015 по 2019 годы Лесняк Любовь Ивановна проходила заочное обучение в аспирантуре Донского государственного технического университета при кафедре «Сопротивление материалов».

В настоящее время соискатель Лесняк Любовь Ивановна работает учебном отделе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2020 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова» (кандидатский экзамен по специальности 02.00.06 — Высокомолекулярные соединения) и федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Донской государственной технической университет» (кандидатский минимум по иностранному языку и философии).

Научный руководитель — Языев Батыр Меретович, доктор технических наук (02.00.06), профессор, профессор кафедры «Сопротивление материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет».

По результатам рассмотрения диссертации «Влияние инерционных сил на остаточные напряжения и реологию полимеров и композитов на их основе» принято следующее заключение:

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время полимерные материалы всё чаще находят применение в качестве конструкционного материала, воспринимающего значительные внешние нагрузки.

Отдельно необходимо отметить полимерные изделия, вращающиеся вокруг одной из своих осей. Примерами таких изделий могут быть валы, оболочки вращения и т. д. При наличии центробежной силы возможно перераспределение в композите твердых частиц в области внешней грани, что позволяет создавать конструкции с заранее заданными свойствами, к примеру, изменением модуля упругости изделия по радиусу.

Начиная с конца XX века зарубежными учёными (Матти Хольцберг, компания Polimotor) ведутся разработки пластиковых двигателей для автомобилей. Мощность пластикового двигателя при этом может достигать 300 л. с., а масса снижена до 69 кг (оригинальный мотор выдавал 88 л. с. при массе в 188 кг). Сильная зависимость полимера от температуры отражается на фактическое напряженно-деформированное

состояние (далее — НДС) полимерных изделий (например, после отверждения полимерного связующего), в частности, для цилиндрической формы, по толщине.

Отличительным свойством полимеров является реология, развитие которой происходит не в фазе с напряжениями. Существует много различных уравнений состояния, учитывающих наличие пластических деформаций или деформаций ползучести, в том числе, используемых в многочисленных комплексах, в основе которых лежит метод конечных элементов (далее — МКЭ). Наиболее точным является обобщённое нелинейное уравнение Максвелла в форме, предложенной Гуревичем (далее — уравнение Максвелла–Гуревича), поскольку учитывает обратимые во времени деформации ползучести.

Используемые учёными программные комплексы по расчёту конструкций и их элементов (ANSYS, Abaqus, Solid Works и др.) основаны на МКЭ и не содержат каких-либо уравнения связи, подходящие для описания обратимых деформаций ползучести полимеров. Таким образом, полноценное описание работы полимерных изделий требует написания программных модулей для учёта обратимых деформаций на основе уравнения Максвелла–Гуревича.

Вопрос расчета изделий из полимерных материалов с учётом инерционных сил и изменения их физико-механических параметров от температурного воздействия остаётся весьма **актуальным**.

Степень изученности проблемы. Анализ проведённого литературного обзора по исследованию НДС полимерных изделий показал, что преимущественно используются физические соотношения на основе линеаризованных уравнений, что не позволяет произвести моделирование работы полимерных конструкций в условиях, приближенных к реальным. Решение данных задач может быть получено лишь при использовании нелинейных физических соотношений. Ряд соотношений был получен феноменологически, путём некоторых обобщений линейных соотношений в трудах учёных М. И. Розовского, А. А. Ильюшина с коллегами, А. К. Малмейстером и др. В случае ещё более строго подхода требуется применение физической теории, основывающейся на исследовании молекулярной природы деформации рассматриваемых сред.

Практическим вопросам использования полимеров для создания конструкций и последующему определению НДС посвятили свои труды А. Л. Якобсен, В. С. Ромейко, А. Н. Шестопап, А. А. Персион, J. Hessel и др.

Цель работы — прогнозирование остаточных напряжений, возникающих в полимерных изделиях, вращающихся с переменной частотой в неизотермических условиях с учётом изменения физико-механических свойств материала от градиента температурного поля.

Задачи исследования:

1. Разработка методики определения физико-механических параметров полимера (упругих и высокоэластических) на основе математической обработки кривых ползучести полимера.

2. Получение универсальных разрешающих уравнений для решения задачи плоского деформированного состояния полимерного цилиндра с учётом инерционных сил и косвенной неоднородности.

3. Теоретическое исследование реологии цилиндрических образцов из ряда полимеров: эпоксидного связующего ЭДТ-10, безобжимных углеродно-эпоксидных композитных материалов и стекло-эпоксидного полимера (Glass Epoxy Composite) в условиях температурного и силового воздействий.

4. Апробация полученных решений путём использования нескольких независимых методов: метода конечных разностей (далее — МКР) и метода конечных элементов (далее — МКЭ) — с последующим анализом и сопоставлением результатов.

5. Оценка влияния частоты вращения полимерного цилиндра на его НДС в температурном поле.

6. Определение остаточных напряжений в полимерном цилиндре, подверженном циклическому воздействию температурного поля.

Научная новизна работы. В настоящей работе впервые:

1. Получена кинетика развития высокоэластических деформаций полимеров в зависимости от различных частот вращения и температуры образца.

2. Установлено, что ползучесть полимерных материалов адекватно описывается обобщённым уравнением Максвелла-Гуревича с экспоненциальным ядром релаксации, разработанным и предложенным не только для полимеров, но и материалов широкого спектра.

3. Разработана методика определения физико–механических параметров полимеров (упругих и релаксационных) на основе математической обработки экспериментальных кривых ползучести, в частности эпоксидного связующего ЭДТ–10, безобжимных углеродно–эпоксидных композитных материалов и стекло–эпоксидного полимера (Glass Epoxy Composite) в условиях температурного и силового воздействий.

4. Приведены качественная и количественная оценки остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления образцов при вращении с учетом переменного во времени температурного поля.

Теоретическая значимость работы:

1. Проведено исследование НДС вращающихся цилиндров с учётом влияния градиента температурного поля и, как следствие, наведённой неоднородности материала.

2. Предложен комплексный подход по оптимизации математической модели определения НДС цилиндрических полимерных тел.

Практическое значение работы:

1. Совместно с группой компаний АКСстрой (далее — ГК АКСстрой) внедрены результаты исследования при расчёте и прогнозировании напряжённо-деформированного состояния полимерных оболочек, используемых в качестве опалубки при изготовлении винтовых свай. Полимерные оболочки подвергаются температурному воздействию, приводящему к изменению их физико-механических параметров для упрощения процесса формования. Внедрение результатов теоретических изысканий позволило внести корректировки в технологию изготовления оболочек, в результате чего экономический эффект составил до 20 тыс. руб. на изделие, что суммарно составляет до 2 млн. руб. в год.

2. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа производит расчёт остаточных напряжений при производстве изделий, имеющих форму вращения.

Методология и методы исследования. Используются аналитические и численные методы, такие как МКЭ и метод конечных разностей (далее — МКР) с применением современного математического пакета Octave (MatLab).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совершенствование существующей методики определения параметров уравнения состояния на основе математического анализа экспериментальных данных испытаний образцов на ползучесть и представления физико-механических параметров материала как функции температуры.

2. Результаты определения физико-механических параметров полимеров и композитов как аппроксимирующей степенной функции температуры второго порядка.

3. Результаты определения НДС полимерного изделия цилиндрической формы в условиях: переменного температурного поля, наличия косвенной неоднородности, различных частотах вращения образца.

4. Доказано, что направление температурного градиента во вращающихся полимерных цилиндрических изделиях приводит к значительному изменению НДС, что влияет на величину остаточных напряжений.

1. **Достоверность результатов** обеспечивается:

2. Проверкой выполнения всех граничных условий, дифференциальных и интегральных соотношений.

3. Сопоставлением полученных результатов решения частных задач с рядом решений независимых авторов.

4. Анализ совпадения результатов решения задач, полученных при помощи нескольких численных методов (МКР и МКЭ).

Апробация работы. Основные положения диссертации отражены в печатных и электронных публикациях, из них в 11-ти изданиях, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК РФ и/или входящих в международные базы цитирования Scopus/Web of Science, а также в 6-ми материалах конференций (материалы XIII и XVI международных научно–практических конференций, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, Нальчик; Строительство–2014, Ростовский государственный строительный университет, Ростов–на–Дону; Строительство–2017, Донской государственный технический университет, Ростов–на–Дону).

Внедрение результатов работы. Имеется 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ, а также акты внедрения ГК АКСстрой.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 17 печатных и электронных работах, из них в ведущих рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ — 4, в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science — 7, в других периодических изданиях — 6, получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, библиографического списка и трёх приложений. Изложена на 119 страницах машинописного текста и со-держит 60 рисунков и 4 таблицы.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, или входящих в международные реферативные базы Scopus/Web of Science:

1. Litvinov, S. V. Flat Axisymmetrical Problem of Thermal Creepage for Thick-Walled Cylinder Made Of Recyclable PVC / S. V. Litvinov, **L. I. Trush**, S. B. Yazyev // Procedia Engineering. — 2016. — № 150. — С. 1686–1693. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816314734>.
2. Литвинов, С. В. Моделирование термползучести неоднородного толстостенного цилиндра в осесимметричной постановке / С. В. Литвинов, **Л. И. Труш**, А. Е. Дудник // Инженер. вестник Дона. — 2016. — № 2. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3560>.
3. Trush, L. Optimization of the Solution of a Plane Stress Problem of a Polymeric Cylindrical Object in Thermoviscoelastic Statement / **L. Trush**, S. Litvinov, N. Zakieva, S. Bayramukov // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. — Advances in Intelligent Systems and Computing. — Т. 692. — С. 885–893. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-70987-1_95.
4. Litvinov, S. V. Optimization of thick-walled spherical shells at thermal and power influences / S. V. Litvinov, A. N. Beskopylny, **L. I. Trush**, S. B. Yazyev // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Т. 106 (2017). — С. 04013. — URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/20/matec-conf_spbw2017_04013/matecconf_spbw2017_04013.html.
5. Litvinov, S. V. Some features in the definition of the temperature field in axisymmetric problems / S. V. Litvinov, **L. I. Trush**, A. A. Avakov // 2017 International

Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — 2017. — С. 1–5.

6. Litvinov, S. V. Determination of the Stress-Strain State of a Rotating Polymer Body / S. V. Litvinov, **L. I. Trush**, S. B. Yazyev // Materials Science Forum. — 2018. — Т. 935. — С. 121–126. — URL: <https://www.scientific.net/MSF.935.121>. — DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.935.121>.

7. Литвинов, С. В. Теоретическое исследование модифицированных упругих и высокоэластических параметров полиэтилена высокой плотности на основе экспериментальных кривых релаксации / С. В. Литвинов, **Л. И. Труш**, А. А. Савченко, С. Б. Языев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2019. — Т. 62. — № 5. — С. 78–83. — URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/1261/783>.

8. Литвинов, С. В. Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрического тела из модифицированного ПЭВП / С. В. Литвинов, **Л. И. Труш**, С. Б. Языев, И. М. Зотов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2019. — Т. 62. — № 7. — С. 118–122. — URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/1488>.

9. Lesnyak, L. I. Modeling of residual stresses in a polymer cylinder arising from rotation and cooling of the starting material / **L. I. Lesnyak**, B. M. Yazyev, A. A. Avakov, L. L. Dubovitskaya // Key Engineering Materials. — 2020. — Т. 869. — С. 202–208. — URL: <https://www.scientific.net/KEM.869.202.pdf>.

10. Лесняк, Л. И. Изменение напряженно-деформированного состояния полимерного цилиндра при переменных физических и температурных нагрузках / **Л. И. Лесняк**, А. С. Чепурненко, С. В. Литвинов, Б. М. Языев // Известия Кабардино-Балкарского гос. университета. — 2020. — № 4. — С. 37–42.

11. Lesnyak, L. I. Analysis of Residual Stresses in a Polymer Cylinder when it is Stopped and then Cooled in a Nonlinear and Linearized Problem Settings / **L. I. Lesnyak**, V. I. Andreev, S. B. Yazyev, A. A. Avakov, I. G. Doronkina // Key Engineering Materials. — 2021. — Т. 899. — С. 486–492. — URL: <https://www.scientific.net/KEM.899.486>. — DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.899.486>.

Статьи в других изданиях:

1. Литвинов, С. В. Равнопрочные и равнонапряжённые конструкции: преимущества и недостатки / С. В. Литвинов, А. С. Чепурненко, **Л. И. Труш** //

Строительство–2014: материалы междунар. науч.-практ. конф. — Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2014. — С. 189–190.

2. Литвинов, С. В. Прогнозирование прочности адгезионного соединения в течение длительного периода времени / С. В. Литвинов, **Л. И. Труш**, Е. Н. Пищереико, А. А. Аваков // материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. — Нальчик: КБГУ, 2017. — С. 162–167.

3. Литвинов, С. В. Напряжённо-деформированное состояние тел вращения в вязко-упругой постановке / С. В. Литвинов, **Л. И. Труш**, А. А. Аваков // Строительство и архитектура — 2017: материалы науч.-практ. конф. — Ростов н/Д: ДГТУ, 2017. — С. 186–194.

4. Труш, Л. И. Оптимизация решения плоской задачи полимерного цилиндрического тела в термовязкоупругой постановке / **Л. И. Труш**, С. В. Литвинов, Е. Н. Пищереико, А. Е. Дудник // материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. — Нальчик: КБГУ, 2017. — С. 246–253.

5. Лесняк, Л. И. Моделирование остаточных напряжений в полимерном цилиндре, возникающих от вращения и остывания исходного материала / **Л. И. Лесняк**, Б. М. Языев, С. В. Литвинов // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: Материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. / КБГУ. — Нальчик, 2020. — С. 245–250.

6. Лесняк, Л. И. Сравнение напряжённо-деформированного состояния вращающегося полимерного тела в нелинейной и линеаризованной постановках / **Л. И. Лесняк**, Б. М. Языев, С. В. Литвинов // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения. Материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. / КБГУ. — Нальчик, 2021. — С. 135.

Авторские свидетельства на программу для ЭВМ:

1. Моделирование адгезионного соединения на нормальный отрыв двух цилиндрических дисков: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018616951 / Литвинов С. В., Дудник А. Е., Аваков А. А., **Труш Л. И.**; Дон. гос. техн. ун-т. — №2018614101; заявл. 24.04.2018; зарег. 09.06.2018.

2. Расчёт остаточных напряжений при производстве изделий, имеющих форму вращения: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020660684 / Хаширова С. Ю., **Лесняк Л. И.**, Литвинов С. В., Языев С. Б., Молоканов Г. О., Чепурненко

А. С.; Кабардино-Балкарский гос. ун-т. — № 2020617798; заявл. 27.07.2020; зарег. 09.09.2020.

Диссертационная работа «Влияние инерционных сил на остаточные напряжения и реологию полимеров и композитов на их основе» Лесняк Любови Ивановны рекомендуется к публичной защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности: 1.4.7. Высокомолекулярные соединения.

Заключение принято на совместном заседании кафедр «Сопротивление материалов» и «Техническая механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет».

На заседании присутствовало 15 чел.

Результаты голосования: «за» — 15 чел., «против» — нет, «воздержалось» — нет (протокол от 22 ноября 2021 года №4).

Заведующий кафедрой
«Техническая механика», д.т.н., проф.

Леонид Николаевич
ПАНАСЮК

Заведующий кафедрой
«Сопротивление материалов», к.т.н.,
доц.

Степан Викторович
ЛИТВИНОВ

Подписи рук Л. Н. Панасюка и
С. В. Литвинова удостоверяю,
начальник управления кадров ДГТУ



Ольга Ивановна
КОСТИНА