

На правах рукописи



Булгаков Александр Николаевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПО ТРАЕКТОРИЯМ «СМЕЩЁННОГО ВЕЕРА»**

Научная специальность 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ) на кафедре «Автомобильные дороги, основания и фундаменты».

Научный руководитель: **Гультяев Вадим Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Темис Юрий Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, советник генерального директора по образовательной деятельности ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Зингерман Константин Моисеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования и вычислительной математики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Защита состоится «24» декабря 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.410.03 на базе ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» по адресу: 170026, Россия, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д.22, ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» и на сайте ВУЗа по адресу: <https://new.tstu.tver.ru/science/dissertation/24.2.410.03/#pills-defense>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



**Алексеев
Андрей Алексеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Экспериментальные исследования в механике сплошной среды имеют фундаментальное значение. Понимание поведения материалов при различных нагрузках позволяет инженерам в самых разных отраслях промышленности, от добывающей до авиационно-космической и медицинской, оптимизировать дизайн и конструкцию, использовать более эффективные решения при обеспечении безопасности, надежности и долговечности конструкций, а в металлургии и металлообработке – улучшать процессы получения и обработки материалов для достижения нужных физико-механических свойств.

Предпосылки и мотивация для исследования.

Потенциал достоверного предсказания упругопластического поведения материалов при разнообразных внешних нагрузках тесно связан с математическим и компьютерным моделированием, совершенствованием методов расчета и проведением экспериментальных исследований.

Эксперименты позволяют проверять, подтверждать или опровергать предположения, выдвигаемые научными теориями, путем сопоставления полученных в ходе эксперимента данных с теоретическими прогнозами. Они предоставляют новые эмпирические данные и наблюдения, которые могут стимулировать пересмотр и уточнение существующих теорий, внесение дополнительных факторов и условий в модели для повышения их точности и применимости к реальным условиям, а также использоваться для создания новых концепций и формирования парадигм.

Теоретико-экспериментальные исследования являются важной частью образовательного процесса для таких научных специальностей, как материаловедение, строительная механика, механика сплошных сред, биомеханика, биоинженерия и др. Они позволяют учёным не только применять теоретические знания на практике, но и осваивать современные методы и способы исследования. Такая активность формирует критическое мышление, самостоятельность и вырабатывает творческий подход к решению научных задач, способствуя развитию будущих научных кадров.

Наконец, эти исследования могут привести к созданию новых материалов, которые революционизируют существующие отрасли и откроют двери для новых областей разработки, патентования и применения коммерчески успешных продуктов.

Таким образом, проведение экспериментальных исследований в области теории пластичности необходимо для развития науки, технологий и инженерных решений, что в конечном итоге способствует прогрессу в различных отраслях промышленности и повышению общего качества жизни.

Актуальность темы исследования.

Тонкостенные конструкции являются основой наиболее передовых и высокотехнологичных областей в машиностроении, роботостроении,

авиаракетостроении и строительстве. В реальных условиях эксплуатации они часто подвергаются сложному комбинированному нагружению и деформированию. Современные модели, используемые в инженерной практике, не позволяют в полной мере учитывать явления, возникающие при этих процессах. Данная работа направлена на экспериментальное исследование сложного упругопластического деформирования конструкционных изотропных материалов, изучение закономерностей напряженно-деформируемого состояния, характеристик векторных и скалярных свойств, а также функционалов пластичности необходимых для математического моделирования.

Степень разработанности темы.

Становление и последующее развитие теории пластичности в структуре механики деформируемого твердого тела неразрывно связаны с именами О. Коши, М. Навье, С. Пуассона, М. Сен-Венана, А. Треска, М. Леви, Т. Губера, Р. Мизеса, О. Мора и многих других ученых.

В XX веке интерес ученых к проблеме пластичности привел возникновению и развитию нескольких принципиально разных направлений теории пластичности, совершенствованием которых в разные годы занимались известные отечественные ученые В.В. Соколовский, Ю.Н. Работнов, В.В. Москвитин, В.В. Новожилов, М.Я. Леонов, Л.М. Качанов, Г.И. Быковцев, А.А. Ильюшин, Л.А. Толоконников, В.С. Ленский, С.А. Христианович, В.З. Партон, В.Д. Ключников, А.Ю. Ишлинский, Е.И. Шемякин, Д.Д. Ивлев, Ю.Н. Шевченко, Ю.И. Кадашевич, Р.А. Васин, В.Г. Зубчанинов, Б.Д. Аннин, В.С. Бондарь, А.И. Хромов, Ю.Н. Радаев, Ю.М. Темис. Среди иностранных ученых, внесших значительный вклад в развитие теории пластичности, можно выделить В. Прагера, Б. Поля, А. Надаи, Р. Хилла, Дж. Райса, Ф.Э. Макклинтока, Э.А. Дэвиса, Ж.-Л. Шабоша и др.

Анализ актуальной научной литературы показывает, что имеющихся экспериментальных данных недостаточно для надежной аппроксимации и моделирования процессов при произвольных траекториях деформирования, чем обоснована необходимость проведения дополнительных экспериментов. Одним из наиболее интересных и перспективных направлений является теория упругопластических процессов, сформированная А.А. Ильюшиным и развиваемая в трудах В.Г. Зубчанинова и его учеников.

Объектом исследования является процесс сложного упругопластического деформирования цилиндрических тонкостенных оболочек, изготовленных из конструкционных изотропных материалов.

Предметом исследования являются закономерности напряженно-деформируемого состояния, характеристики векторных и скалярных свойств, а также функционалы пластичности при сложном нагружении.

Цель работы заключается в обосновании достоверности моделей современной теории упругопластических процессов, учитывающих характеристики векторных и скалярных свойств при аппроксимации функционалов пластичности, базирующемся на массиве новых эмпирических данных, полученных в ходе испытаний изотропных конструкционных материалов при сложном упругопластическом нагружении.

Основные задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

1. Разработать программу проведения экспериментального исследования сложных процессов деформирования на основе анализа имеющихся результатов и существующих подходов по установлению закономерностей упругопластического деформирования материалов.

2. Организовать подготовку и провести серию экспериментов, направленных на изучение поведения материалов при разной степени предварительного простого (пропорционального) деформирования и различных углах излома траекторий деформирования.

3. Реализовать автоматизированный расчетный модуль для обработки массива экспериментальных данных, определения параметров аппроксимации и графического отображения результатов.

4. Верифицировать полученные экспериментальные данные и идентифицировать ключевые параметры для моделирования процессов сложного упругопластического деформирования.

5. Определить длину следов запаздывания скалярных и векторных свойств для двухзвенных ломаных траекторий по типу смещённого веера.

6. Провести сравнительный анализ экспериментально найденных и теоретически рассчитанных величин функционалов пластичности и оценить точность используемых аппроксимаций.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Получены новые экспериментальные данные для двухзвенных ломанных в широком диапазоне углов излома при различном начальном пластическом деформировании на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ.

2. Разработан автоматизированный расчетный модуль, позволяющий на основе массива экспериментальных данных определять параметры аппроксимации функционалов пластичности, учитывающие характеристики скалярных и векторных свойств, и моделировать процесс деформирования.

3. Определены базовые характеристики аппроксимирования функционалов пластичности, необходимые при численном математическом моделировании процессов сложного упругопластического деформирования материалов по траекториям в виде двухзвенных ломанных с различными углами излома.

4. Показана линейная зависимость между углом излома траектории и длиной следов запаздывания скалярных и векторных свойств, а также влияние длины участка начального пластического деформирования на величину следа запаздывания скалярных свойств.

5. Экспериментально подтверждена возможность применения определяющих соотношений гипотезы компланарности теории процессов, предложенных В.Г. Зубчаниновым для произвольных углов излома. Показана универсальность аппроксимаций функционалов независимо от активного или пассивного процессов деформирования.

Теоретическая и практическая ценность работы подтверждается применением полученных экспериментально-теоретических результатов специалистами ООО «Тверьавтодорпроект» при расчете и проектировании мостовых сооружений. Кроме того, материалы диссертации внедрены в образовательный процесс Тверского государственного технического университета: они интегрированы в программы обучения аспирантов (специальность 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела») и используются при подготовке магистров направления 08.04.01 «Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог» на кафедре «Автомобильные дороги, основания и фундаменты».

Методология и методы диссертационного исследования.

Экспериментальная часть работы проводилась с применением автоматизированного испытательного оборудования кафедры «Сопротивление материалов, теория упругости и пластичности» ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет». Точность и методика измерения геометрических параметров трубчатых образцов соответствуют действующим нормативным стандартам. Верификация надежности экспериментальных данных проводилась методами теории вероятностей и математической статистики. Достоверность компьютерного моделирования проверялась путем сопоставления с собственными экспериментальными результатами и с работами других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования сложного пластического деформирования по двухзвенным траекториям деформирования типа смещённого веера в широком диапазоне углов излома при различном начальном пластическом деформировании.

2. Автоматизированный расчетный модуль для определения параметров аппроксимации функционалов пластичности и моделирования процесса сложного упругопластического деформирования с учётом характеристик скалярных и векторных свойств.

3. Сформированный комплекс параметров аппроксимации, установленных по данным базовых опытов и обеспечивающий высокую точность численного моделирования сложных упругопластических

процессов при деформировании по двухзвенным ломаным траекториям с различными углами излома.

4. Результаты численного моделирования процессов сложного деформирования и определения длины следов запаздывания скалярных и векторных свойств по траекториям типа смещённого веера.

5. Сравнительный анализ экспериментального и теоретического определения функционалов пластичности N , P и $d\sigma/ds$ по соотношениям, предложенным В.Г. Зубчаниновым для произвольных углов излома в рамках гипотезы компланарности теории упругопластических процессов.

Степень достоверности результатов.

Работа основана на строгом аппарате математической теории пластичности. Использованные физические модели являются адекватными, а методы исследования в достаточной степени точными. Полученные результаты тщательно анализировались и сравнивались с известными частными случаями и результатами других авторов.

Апробация результатов работы.

Основные положения и выводы, полученные в ходе диссертационного исследования, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) 56-я Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов УО «ВГТУ» (Республика Беларусь, г. Витебск, 19 апреля 2023 года);

2) 57-я Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов УО «ВГТУ» (Республика Беларусь, г. Витебск, 18–19 апреля 2024 года);

3) 58-я Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов «Education and Science in the development of Technology, Economy and Society» (ESTES-2025), посвященная 60-летию УО «ВГТУ» (Республика Беларусь, г. Витебск, 16–17 апреля 2025 года);

4) 59-я Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов «Education and Science in the development of Technology, Economy and Society» (ESTES-2026). Беларусь, Витебск, 15–16 апреля 2026 года;

5) 51-я Школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (АПМ2024) памяти Д.А. Индейцева (Российская Федерация, г. Великий Новгород, 19–21 июня 2024 года);

6) 52-я Школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (АПМ2025) памяти Н.Ф. Морозова (Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 23–27 июня 2025 года);

7) XII Международная научная Четаевская конференция «Аналитическая механика, устойчивость и управление» (Российская Федерация, г. Казань, 16–20 июня 2025 года);

8) Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Российская Федерация, г. Белгород, 20–21 мая 2024 года;

9) XXV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Российская Федерация, г. Тула, 26–28 июня 2024 года);

10) The 6th International Conference on Metal Material Processes and Manufacturing (ICMMPM 2024) (UAE, Dubai, 16–18 December 2024).

Личный вклад соискателя в получении научных результатов состоит в постановке задач, разработке экспериментальной методики и самостоятельном проведении испытаний по различным траекториям сложного деформирования. Автором лично осуществлены сбор, систематизация и математическая обработка эмпирических данных, их сопоставление с известными научными результатами, а также подготовка публикаций в рецензируемых изданиях. Все сторонние теоретические и практические материалы сопровождаются соответствующими библиографическими ссылками.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование по своей тематике, поставленным задачам, методам и полученным научным результатам соответствует паспорту специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела» по следующим пунктам: п. 1 – Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых; п. 3 – Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости; п. 13 – Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

Структура и объем работы.

Работа включает пять основных глав, введение, заключение, список литературы и пять приложений. Общий объем диссертации составляет 229 страниц. Основной текст изложен на 142 страницах и включает 98 рисунков и 11 таблиц. Список использованных источников содержит 192 наименования на 26 страницах; объем приложений составляет 58 страниц.

Публикации.

Основные результаты диссертационного исследования отражены в 22 публикациях, из них 4 входят в Перечень Российских рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, и 4 в рецензируемые базы цитирования Scopus и Web of Science.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описаны предпосылки и мотивация для проведения исследования, отражены актуальность работы и степень разработанности

темы, сформулированы цель работы и основные задачи, представлены научная новизна, методы и методология исследования, положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов, приведены данные об апробации и публикациях по теме исследования, показан личный вклад соискателя.

Первая глава посвящена историческому обзору и анализу современного состояния теории пластичности. Кратко описаны процессы становления науки о твердых телах и формирования современных теорий пластичности, проведен анализ достижений различных научных школ, в том числе А.А. Ильюшина, В.Г. Зубчанинова, Д.Д. Ивлева, В.С. Бондаря, П.В. Трусова и др. Можно сделать вывод о том, что каждая из них вносит свой важный вклад в понимание механизмов деформации материалов на микро-, мезо- и макроуровнях, однако все существующие подходы нуждаются в проведении экспериментальных исследований, особенно при сложном нагружении.

Во **второй главе** отражены теоретические основы исследования процессов сложного пластического деформирования, дано математическое представление функционалов пластичности и описаны подходы к аппроксимации процесса деформирования. Методика проведения экспериментальных исследований и обработка их результатов базируются на векторном представлении напряжений и деформаций по А.А. Ильюшину.

В **третьей главе** описаны экспериментальная база исследования, условия проведения экспериментов, методика упругопластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении с использованием автоматизированного комплекса СЧ-ЭВМ и верификация полученных результатов. В качестве материала выбрана стандартная углеродистая конструкционная сталь 45, широко используемая в машиностроении и других отраслях промышленности. Эксперименты проводились на тонкостенных цилиндрических образцах длиной 200 мм, диаметром срединной поверхности 31 мм и толщиной стенки на длине рабочей части 1 мм, прошедших контроль геометрических параметров. На рисунке 1 приведены отдельные образцы после испытаний.



Рисунок 1 – Образцы после испытаний, вер 2%

В четвертой главе рассматриваются результаты экспериментального исследования. Программа испытаний реализована в векторном подпространстве деформаций $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ и включает четыре группы опытов. Первая группа (центральный веер) состоит из различных видов простого деформирования (рисунок 2а). Данная серия позволяет оценить начальную изотропию/анизотропию материала. Разброс величин модуля вектора напряжений для диаграмм деформирования $\sigma - s$ и $\sigma - \varepsilon$ не превышает 5–10% (рисунок 2б), поэтому материал образцов можно считать квазиизотропным. Это позволяет использовать в расчетах процессов сложного нагружения общие определяющие соотношения теории упругопластических процессов.

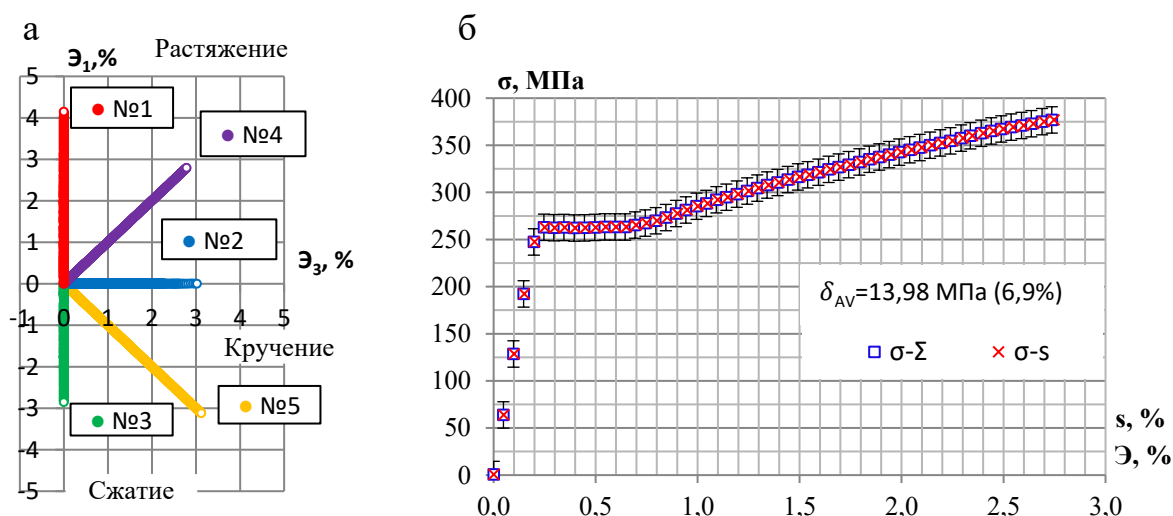
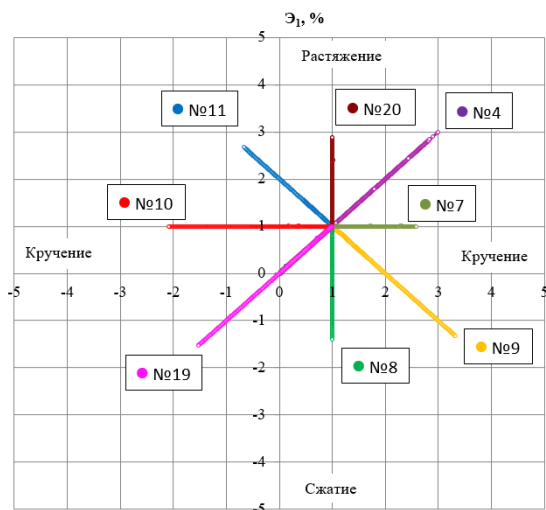


Рисунок 2 – Программа по типу центрального веера (а);
Сравнение диаграмм $\sigma - s$ и $\sigma - \varepsilon$ (б)

Вторая и третья группы представляют собой пропорционально смещённые веера – двухзвенные ломаные траектории с изломами при достижении $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1\%$ (рисунок 3а) и $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2\%$ (рисунок 3б) соответственно. Цель этих опытов – изучение влияния длины участка начального простого деформирования на величину следов запаздывания, а также выявление закономерностей напряженно-деформированного состояния оболочек, когда материал частично разгружается (эффект «нырка»). Четвертая группа включает опыты при больших углах излома траектории для получения дополнительных данных о процессах сложного деформирования и уточнения применяемых математических моделей. По результатам обработки при $\varepsilon = s = \sqrt{2} \% \approx 1,41\%$ и $\varepsilon = s = \sqrt{8} \% \approx 2,83\%$ получены диаграммы $\sigma - s$ (рисунок 4) и $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 5).

а



б

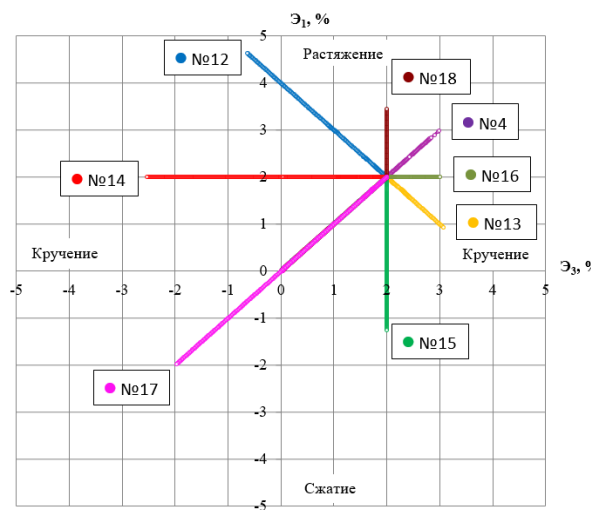
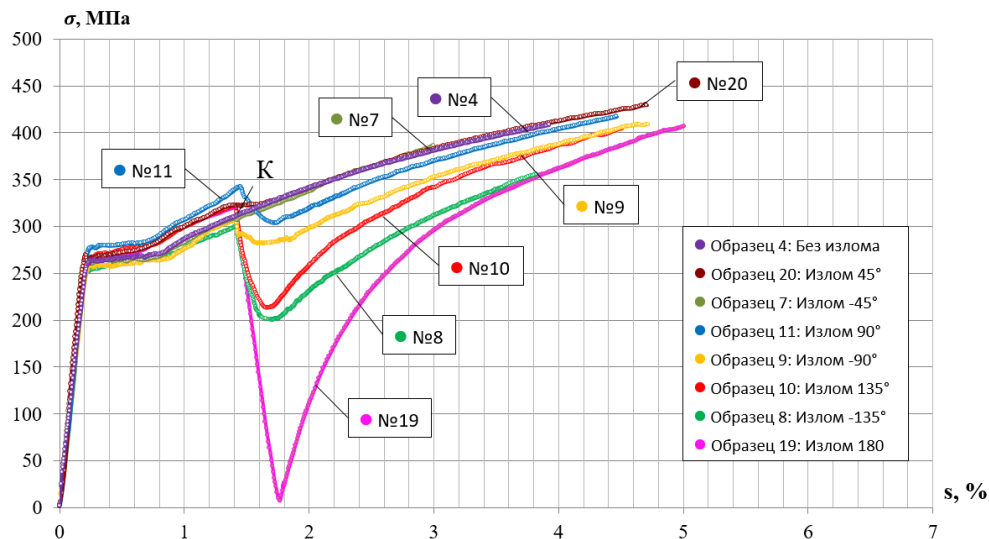


Рисунок 3 – Программы деформирования образцов по типу смещенного веера с изломом при $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1\%$ (а); при $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 2\%$ (б)

а



б

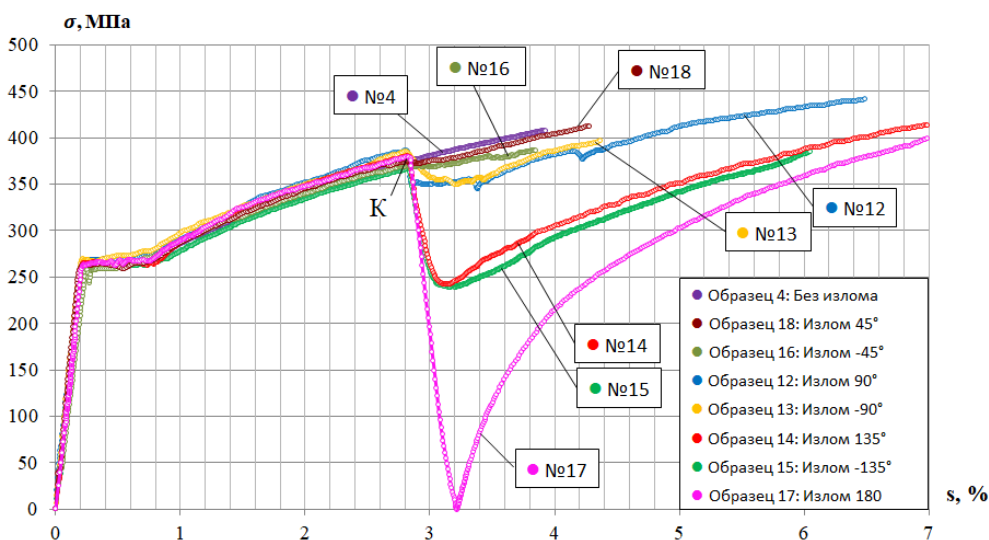


Рисунок 4 – Экспериментальные диаграммы прослеживания процесса $\sigma - s$ при $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1\%$ (а); при $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 2\%$ (б)

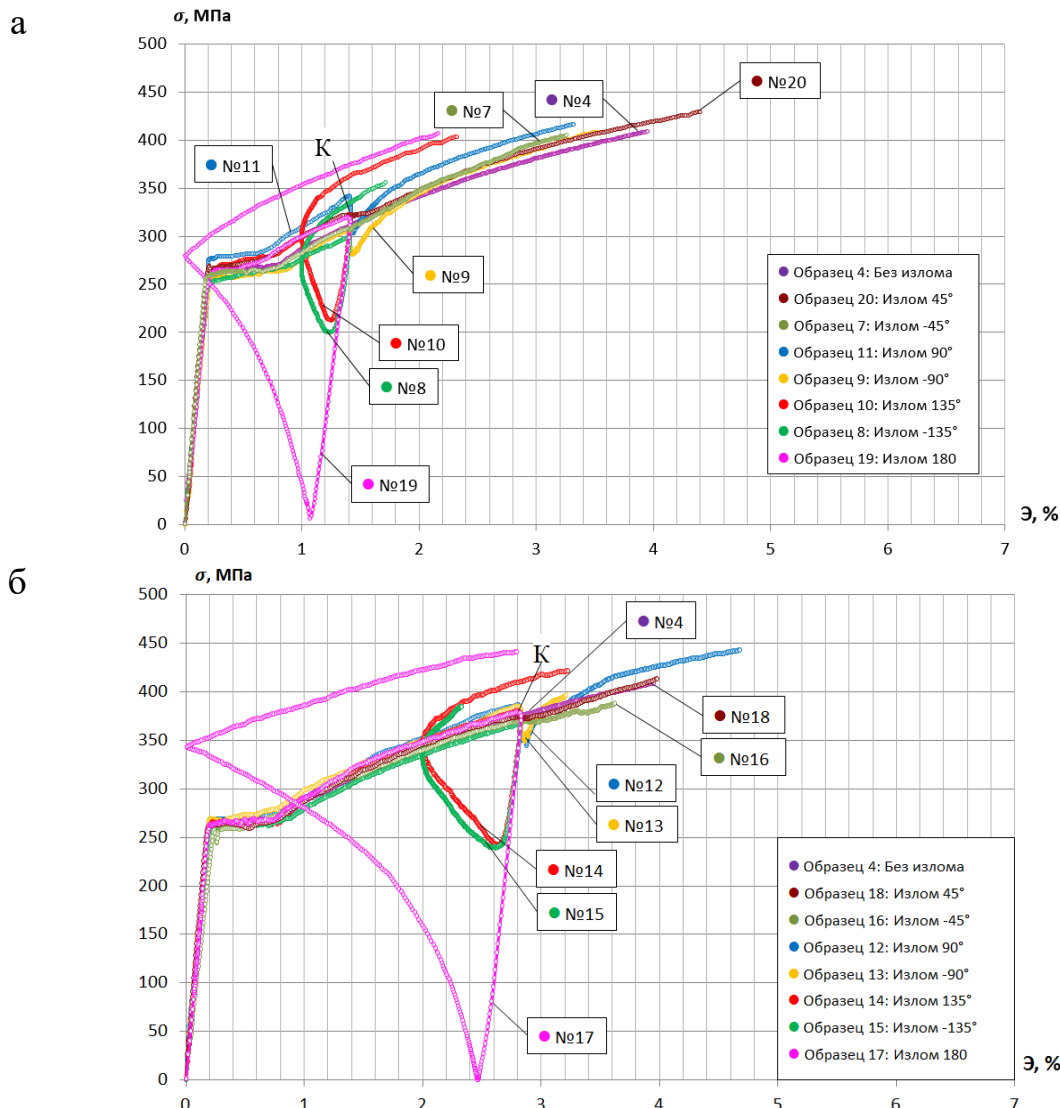


Рисунок 5 – Экспериментальные диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$ при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1\%$ (а); при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2\%$ (б)

В пятой главе для описания исследуемых в опытах процессов с учётом скалярных и векторных свойств приняты определяющие соотношения гипотезы компланарности:

$$\frac{dS_i}{ds} = M_1 \frac{d\varepsilon_i}{ds} + \left(\frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1 \right) \frac{S_i}{\sigma}, \quad \frac{d\vartheta_1}{ds} + k_1 = -\frac{M_1}{\sigma} \sin \vartheta_1. \quad (1)$$

Функционалы, описывающие процесс M_1 , $d\sigma/ds$, зависят от внутренней геометрии траектории деформирования: длины дуги траектории s , кривизны k_1 , угла излома ϑ_1 . Для аппроксимации функций процесса M_1 , $\sigma(s)$ использованы предложенные В.Г. Зубчаниновым соотношения:

$$\sigma(s) = \Phi(s) + A f_0^p \Omega(\Delta s) - \Delta \sigma_k, \quad M_1 = 2G_p + (2G - 2G_p^0) f^q \quad (2)$$

где $\Delta s = s - s_K^T$ – приращение длины дуги траектории после её первого излома в точке К; $\Delta \sigma_k = \Phi(s_K^T) - \sigma_K^T$ – разница в точках излома между значениями универсальной функции Одкависта–Ильюшина и расчетным значением модуля вектора напряжений σ_K^T ; G – модуль сдвига;

$2G_p = \Phi(s)/s$ – удвоенный пластический модуль при простом нагружении; индекс «ноль» у пластического модуля сдвига соответствует его значению в точке излома траектории; $\Omega(\Delta s)$ – функция, описывающая скалярный прыжок напряжений после излома траектории при сложной разгрузке и последующем вторичном пластическом деформировании:

$$\Omega(\Delta s) = -[\gamma \cdot \Delta s \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} + b \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot \Delta s})], \quad (3)$$

$$f = \frac{1 - \cos \vartheta_1}{2}, \quad f_0 = \frac{1 - \cos \vartheta_1^0}{2},$$

A, b, γ, p, q – параметры аппроксимаций.

При заданных начальных условиях для координат вектора деформаций Ξ_k ($k = 1, 3$) и угла сближения ϑ_1^0 определяющие соотношения с конкретизированными функционалами сводятся к задаче Коши, для численного решения которой и определения координат вектора напряжений S_k ($k = 1, 3$) и угла сближения ϑ_1 для каждого участка неаналитической траектории использовался метод Рунге – Кутты четвертого порядка.

Подбор параметров аппроксимации производился по условию минимизации среднего значения модуля разности экспериментальных и расчетных значений с использованием метода обобщённого понижающего градиента. Значения подобранных параметров аппроксимаций A, b, γ, p, q при углах излома α_i приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры аппроксимации

№	α_i	f_0	A	γ	p	b	q
7	-45	0,20	23,02	2,06	0,26	0,16	0,20
8	-135	0,92	214,85	3,74	0,68	0,36	0,60
9	-90	0,54	78,52	3,56	0,59	0,63	0,40
10	135	0,85	252,51	3,81	0,66	0,21	0,60
11	90	0,62	79,82	3,02	0,62	0,80	0,60
12	90	0,60	145,81	1,73	0,60	0,26	0,55
13	-90	0,58	110,03	2,88	0,60	0,40	0,55
14	135	0,90	308,27	2,96	1,04	0,30	0,75
15	-135	0,92	207,41	3,37	0,52	0,52	0,60
16	-45	0,18	3,77	5,02	0,37	10,20	0,30
17	180	1,00	455,56	2,20	0,70	0,10	0,20
18	45	0,08	4,56	18,51	0,24	7,64	0,28
19	180	1,00	646,35	2,77	1,66	0,10	0,10
20	45	0,25	7,05	6,26	0,45	4,52	0,40
21	150	0,94	329,83	4,13	0,91	0,21	0,60
22	165	0,98	453,67	3,01	1,44	0,16	0,72
23	-150	0,94	387,22	3,89	1,44	0,24	0,74

Результаты моделирования для траектории с углом излома 135° при $\Xi_1 = \Xi_3 = 2\%$ приведены на рисунках 6–11.

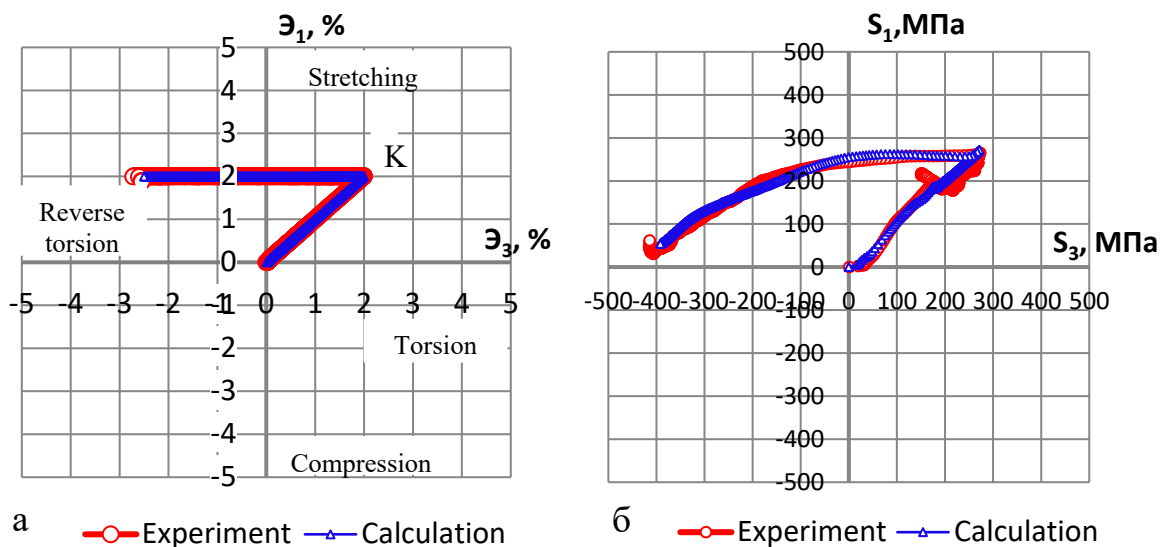


Рисунок 6 – Моделирование программы (а) и отклика на программу (б)

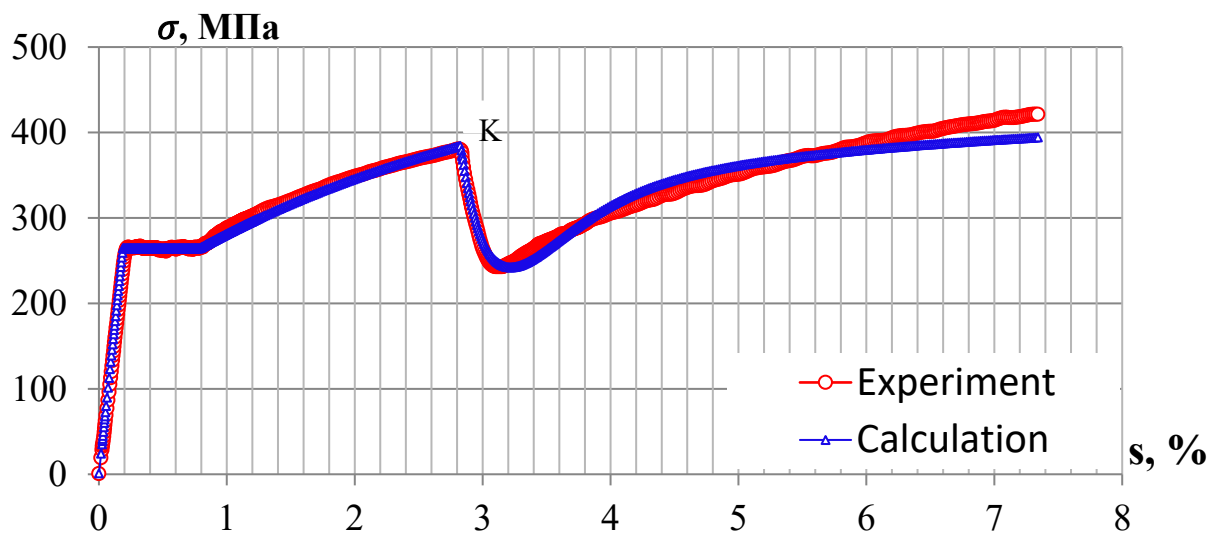


Рисунок 7 – Моделирование диаграммы прослеживания процесса $\sigma - s$

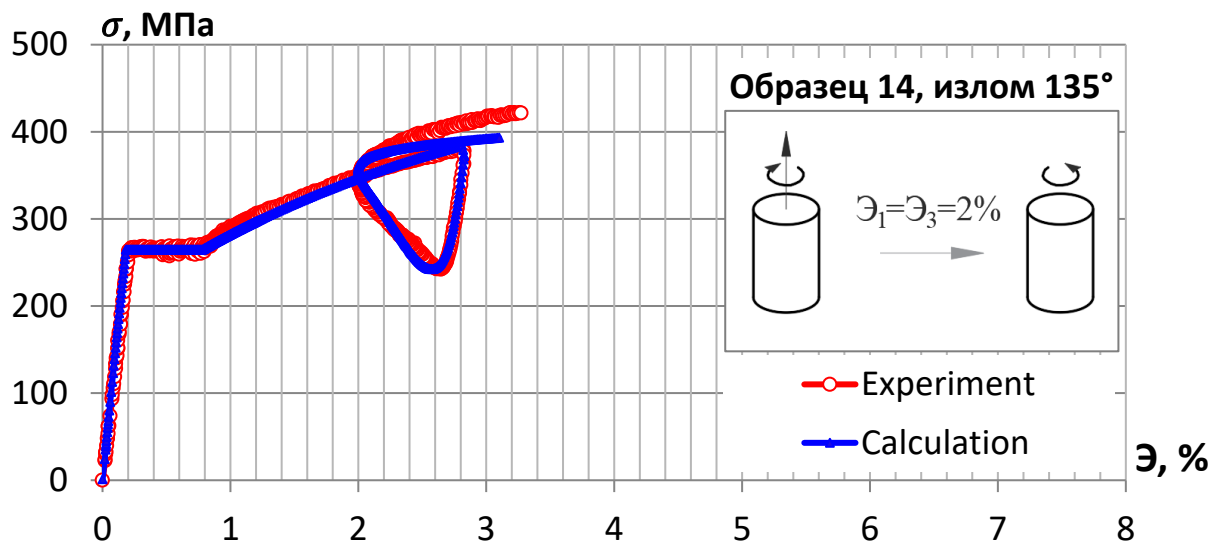


Рисунок 8 – Моделирование диаграммы деформирования $\sigma - \epsilon$

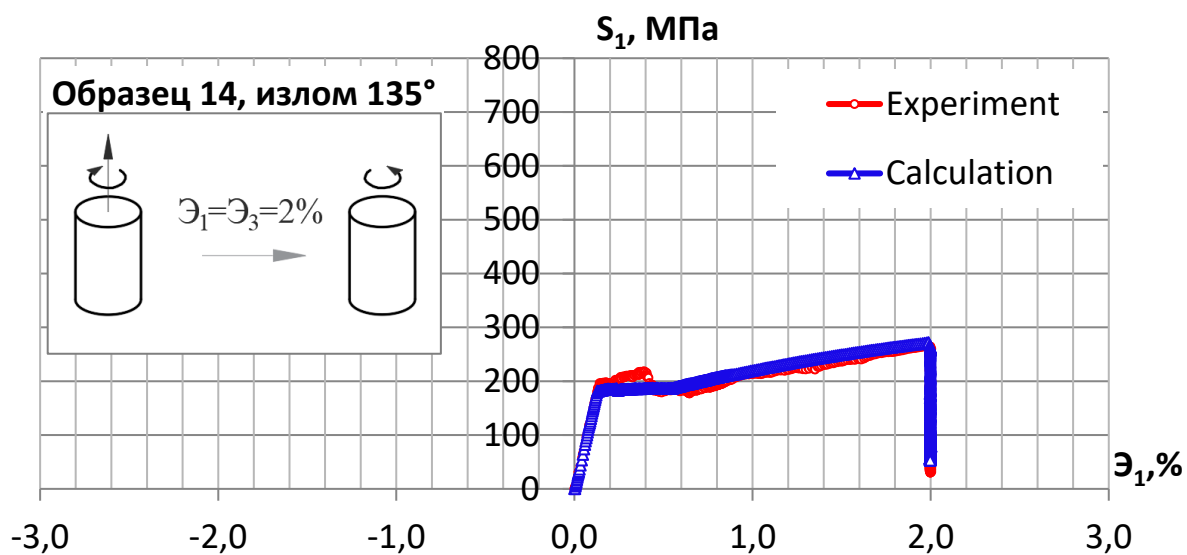


Рисунок 9 – Моделирование локальной диаграммы $S_1 - \varepsilon_1$

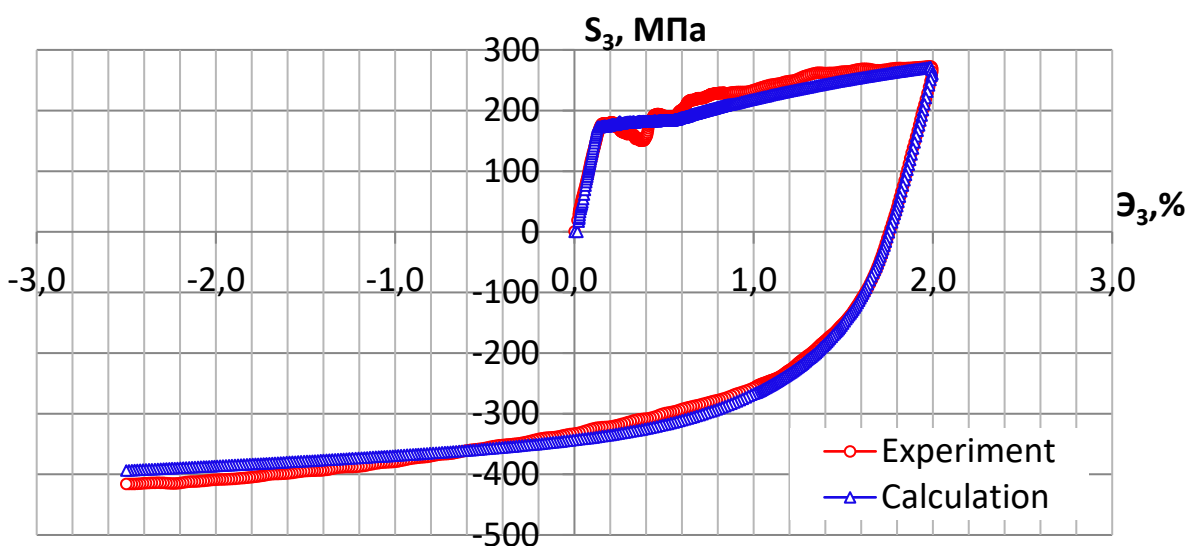


Рисунок 10 – Моделирование локальной диаграммы $S_3 - \varepsilon_3$

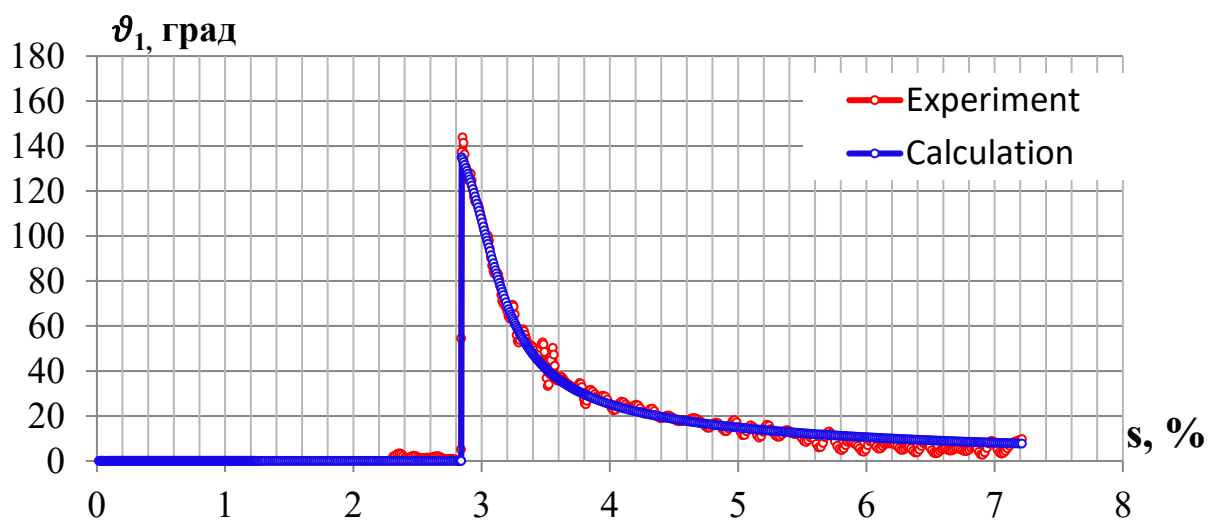


Рисунок 11 – Моделирование диаграммы угла сближения $\vartheta_1 - s$

Сравнение диаграмм при различных длинах участка до излома показывает, что использование общих параметров аппроксимации приводит к снижению её точности (рисунок 12).

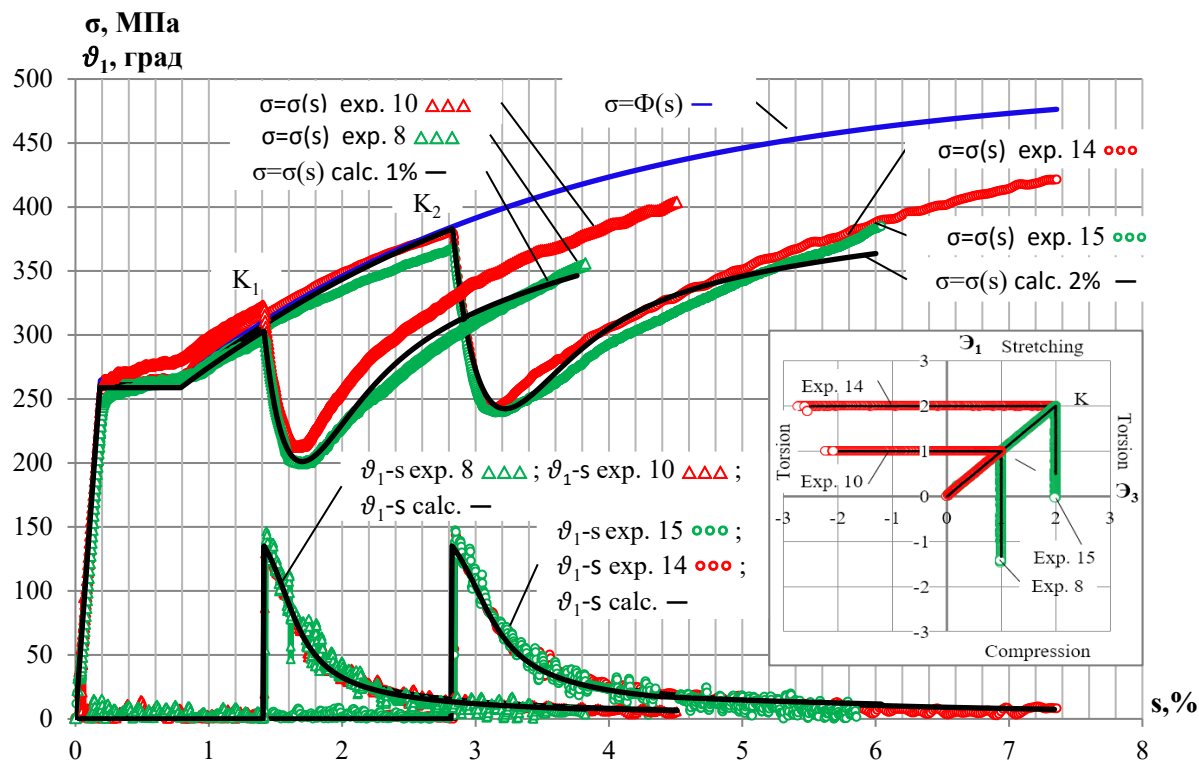


Рисунок 12 – Совмещенные диаграммы для траекторий с углом излома 135° при $\Theta_1 = \Theta_3 = 1\%$ и $\Theta_1 = \Theta_3 = 2\%$

На рисунке 13 приведено сравнение длин следов запаздывания скалярных λ и векторных η свойств, определенных по результатам опытов, а также значения, при которых след запаздывания не был исчерпан из-за потери устойчивости одним из образцов, после чего график обрывался.

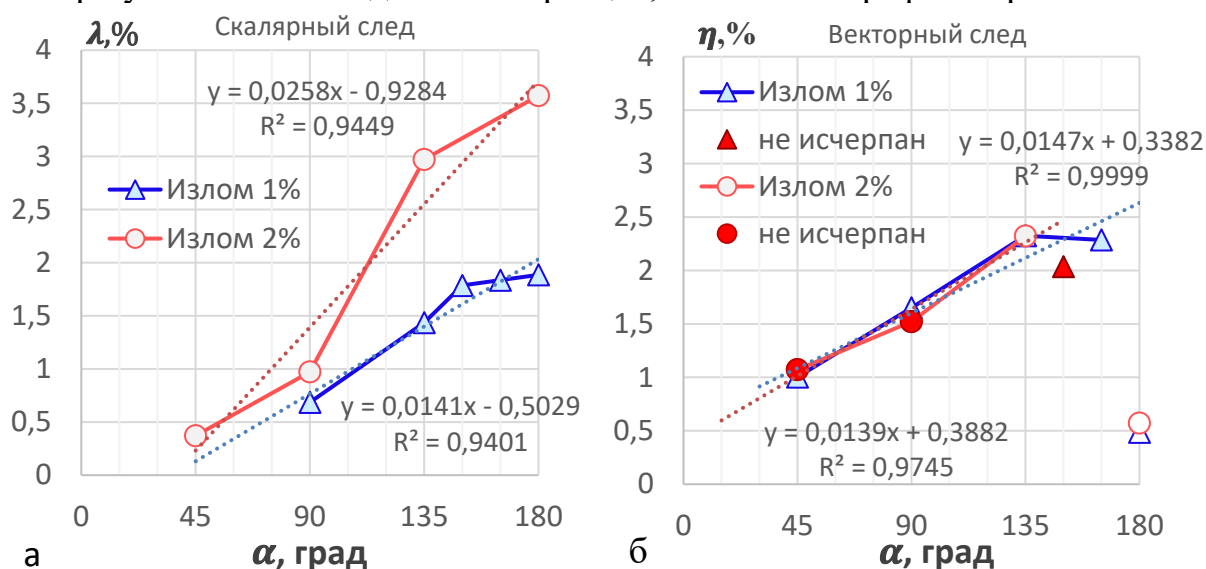


Рисунок 13 – Сравнение длин следов запаздывания скалярных λ (а) и векторных η (б) свойств

Опыты позволили также провести сравнение результатов экспериментального и теоретического определения функционалов N, P и $d\sigma/ds$. Результаты для двухзвенных ломаных траекторий с изломами 135° и -135° представлены на рисунке 14.

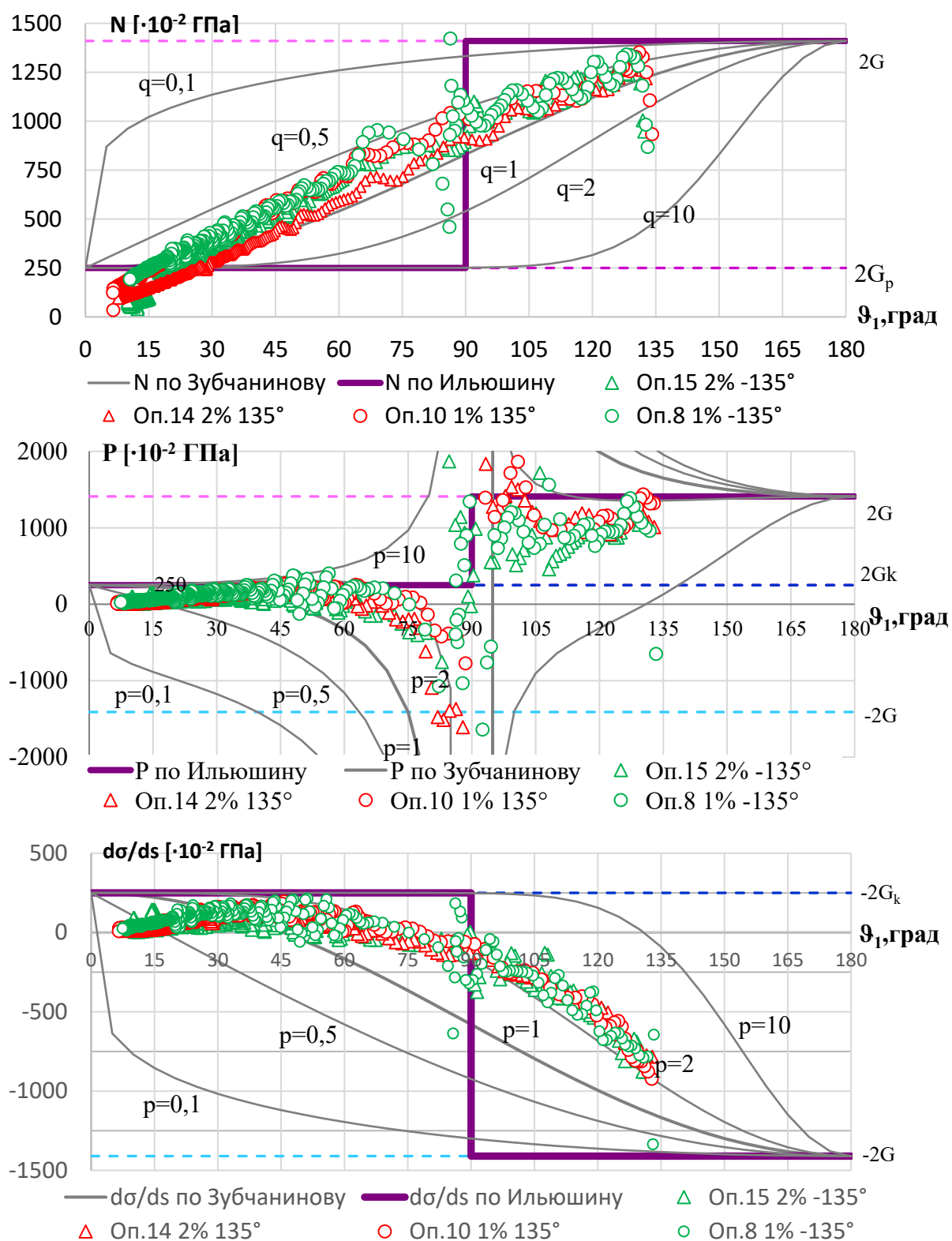


Рисунок 14 – Экспериментальные и теоретические значения функционалов N, P и $d\sigma/ds$ для траекторий с углом излома $\pm 135^\circ$

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Основные результаты.

1. На основе анализа существующих подходов в экспериментальных исследованиях по установлению закономерностей упругопластического поведения конструкционных материалов разработана программа экспериментов в виде смещённых вееров, состоящих из множества плоских ломаных двухзвенных траекторий сложного деформирования, при различных углах излома траекторий деформирования и различной длине участка предварительного деформирования.

2. По разработанной программе для траекторий в виде смещённых вееров получены новые экспериментальные данные по сложному деформированию тонкостенных трубчатых образцов из конструкционного изотропного металла.

3. Реализован автоматизированный расчетный модуль для обработки массива экспериментальных данных, определения параметров аппроксимации, выполнения расчетов и графического отображения результатов.

4. Для класса двухзвенных ломаных траекторий с произвольными углами излома подобраны параметры аппроксимации, которые определяются на основе базовых опытов и могут с достаточной точностью быть использованы при математическом моделировании процессов сложного упругопластического деформирования.

5. Определены длины следов запаздывания скалярных и векторных свойств материалов после сложного деформирования по двухзвенным траекториям с различными углами излома при разных длинах участков траектории до излома.

Основные выводы.

1. Установлено, что при различной длине участка начального простого (пропорционального) деформирования для отраженных траекторий постулат изотропии выполняется как по векторным, так и по скалярным свойствам. Выраженный прямой «нырок» модуля вектора напряжений на диаграммах $\sigma - s$ фиксируется при углах излома 90° и более. В свою очередь, на зависимостях $\sigma - \varepsilon$ прямой «нырок» с последующим выходом на универсальную кривую наблюдается при углах до 90° включительно, а при углах излома траектории деформирования, превышающих 90° , проявляется запаздывание в виде обратного «нырка».

2. Увеличение участка начального простого деформирования до излома приводит к изменению вида кривой деформирования и, соответственно, к изменению параметров аппроксимации. Таким образом, использование одних и тех же параметров аппроксимации при различном предварительном деформировании ведет к снижению точности аппроксимации.

3. Запаздывание скалярных свойств наблюдается при углах излома более 90° , длина скалярного следа запаздывания линейно возрастает до максимального значения при простой разгрузке. Запаздывание векторных свойств наблюдается уже при углах излома 45° , длина следа запаздывания линейно увеличивается с увеличением угла излома траектории. Показано, что вид зависимости $\vartheta_1(s)$ в меньшей степени зависит от длины предшествующего участка траектории простого (пропорционального) деформирования, при этом $\sigma(s)$ и $\sigma(\varepsilon)$ значительно зависят от неё.

4. Увеличение участка предварительного деформирования путем смещения точки излома траектории с $s = \sqrt{2} = 1,41$ до $s = \sqrt{8} = 2,83$ приводит к увеличению длины следа запаздывания скалярных свойств λ в 1,5–2 раза; заметного влияния на след запаздывания векторных свойств не обнаружено.

5. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений функционалов пластичности N , P и $d\sigma/ds$, вычисленных по соотношениям В. Г. Зубчанинова для различных углов излома в рамках гипотезы компланарности теории упругопластических процессов, показало их хорошее соответствие. Полученные результаты обеспечивают дополнительное обоснование надежности рассматриваемых моделей при решении различных краевых задач.

В приложениях представлены: технический акт внедрения (Приложение А), акт о внедрении в учебный процесс (Приложение Б), результаты проведенных экспериментов (Приложение В), химический анализ стали (Приложение Г), сертификат качества стали (Приложение Д).

Перспективы дальнейшего развития темы исследования связаны с изучением поведения функционалов пластичности и длины следов запаздывания скалярных и векторных свойств для многозвенных, криволинейных и пространственных траекторий деформирования и нагружения, в том числе в условиях, отличных от нормальных, а также внедрением полученных результатов работы в современные программные комплексы, реализующие автоматизированные инженерные расчеты и анализ методом конечных элементов.

Благодарности.

Выражаю искреннюю признательность за поддержку и практические советы в ходе проведения исследования моему научному руководителю д.т.н., профессору В.И. Гулятьеву, за конструктивные замечания и консультации – д.т.н., доценту С.Л. Субботину. Глубоко благодарен заслуженному деятелю науки и техники, д.т.н., профессору В.Г. Зубчанинову за ценные указания при выполнении работы. Хочу выразить слова благодарности официальным оппонентам за объективные и высококвалифицированные отзывы, а также за внимание, оказанное членами совета при обсуждении диссертации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Гулятьев, В. И. Экспериментальное исследование материала сталь 45 при деформировании по программам смещённого веера / В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев, А. Н. Широков, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2023. — № 2(56). — С. 88–98. — DOI 10.37972/chgpru.2023.56.2.009.
2. Гулятьев, В. И. Экспериментальное изучение упругопластического деформирования конструкционных материалов на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ / В. И. Гулятьев, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2023. — № 2(56). — С. 53–64. — DOI 10.37972/chgpru.2023.56.2.006.
3. Гулятьев, В. И. Эксперименты на сложное деформирование конструкционных материалов и их аппроксимация по соотношениям В.Г. Зубчанинова / В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2025. — № 3(65). — С. 111–124. — DOI 10.37972/chgpru.2025.65.3.005.
4. Булгаков, А. Н. Длина следов запаздывания скалярных и векторных свойств конструкционных материалов при деформировании по двухзвенным траекториям в виде смещенного веера // Авиационные двигатели. — 2026. — № 1(30). — С. 89–98.

Статьи, входящие в издания, индексируемые в Международных базах данных Web of Science и Scopus

5. Gul'tyaev, V. I. Experimental Verification of the Modern Theory of Processes Provisions in Case of Biaxial Plastic Deformation of Steel 45 / V. I. Gul'tyaev, A. N. Bulgakov, A. A. Alekseev, I. A. Savrasov, A. N. Shirokov // Proceedings of the 6th International Conference on Metal Material Processes and Manufacturing, Volume 2. ICMMPM 2024 / ed. by D.-W. Jung. — Singapore : Springer, 2025. — (Springer Proceedings in Materials ; vol. 90). — DOI 10.1007/978-981-95-0293-6_3.
6. Gultyayev, V. I. Elasto-Plastic Deformation of Structural Materials: an Experimental Research Using Complex Loading Technology (SN-EVM) / V. I. Gultyayev, A. N. Bulgakov // Mechanics of Solids. — 2025. — Vol. 60, No. 5. — P. 3547–3556. — DOI 10.1134/S0025654425603040.
7. Gultyayev, V. I. Approximation of Experimental Results of Complex Deformation of Stretching/Compression with Torsion Along Flat Two-Link Trajectories / V. I. Gultyayev, A. A. Alekseev, A. N. Bulgakov // Mechanics of Solids. — 2025. — Vol. 60, No. 8. — P. 6609–6617. — DOI 10.1134/S0025654425605609.

8. Gul'tyaev V. I. Study of the Lag Trace of Scalar and Vector Properties of Steel 45 Under Deformation Along Offset-Fan Trajectories / V. I. Gul'tyaev, A. A. Alekseev, S. L. Subbotin, A. N. Shirokov, A. N. Bulgakov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2026. — Vol. 55, No. 4. — P. 333–342. — DOI: 10.1134/S1052618826700196.

Статьи в других журналах

9. Зубчанинов, В. Г. Закономерности упругопластического деформирования сталей и сплавов при сложном нагружении / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультяев, А. А. Алексеев, А. Н. Булгаков [и др.] // Тезисы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 19 апреля 2023 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2023. — С. 260. — EDN EKGJPZ.

10. Зубчанинов, В. Г. Закономерности упругопластического деформирования латуни Л63 при сложном нагружении по ломанным и гладким траекториям постоянной кривизны / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультяев, А. А. Алексеев [и др.] // Тезисы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 19 апреля 2023 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2023. — С. 259–260. — EDN CRJYAK.

11. Булгаков, А. Н. Выявление момента появления отклика на диаграмме деформирования стали 45 по траекториям типа смещенного веера / А. Н. Булгаков, А. В. Боков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года : Сборник докладов. — Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. — С. 44–49. — EDN CZOUNH.

12. Боков, А. В. Изучение скалярных и векторных свойств стали 45 при сложном нагружении по траекториям деформирования в виде полуокружностей / А. В. Боков, А. Н. Булгаков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года : Сборник докладов. — Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. — С. 38–44. — EDN SOKLQD.

13. Гультяев, В. И. Экспериментальные исследования упругопластического деформирования тонкостенных цилиндрических оболочек из конструкционных материалов по некоторым сложным траекториям / В. И. Гультяев, А. А. Алексеев, А. Н. Булгаков, А. Н. Широков // Тезисы докладов 57-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 18–19 апреля 2024 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2024. — С. 148–149. — EDN IDIBHK.

14. Булгаков, А. Н. Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании стали 45 по двузвенным траекториям деформирования / А. Н. Булгаков, В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии : Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции, Тула, 26–28 июня 2024 года. — Тула : Тульский государственный университет, 2024. — С. 18–24. — EDN KANEOU.
15. Гулятьев, В. И. Экспериментальные исследования цилиндрических оболочек из сплава В95 на криволинейных траекториях деформирования / В. И. Гулятьев, В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев [и др.] // Тезисы докладов 57-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 18–19 апреля 2024 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2024. — С. 147–148. — EDN MKCADJ.
16. Булгаков, А. Н. Проверка постулата изотропии при сложном деформировании стали 45 по траекториям типа смещённого веера / А. Н. Булгаков, А. Н. Широков, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Тезисы докладов 57-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 18–19 апреля 2024 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2024. — С. 146. — EDN JMZNPI.
17. Гулятьев, В. И. Экспериментальные результаты деформирования оболочек из стали 45 по плоским двухзвенным траекториям типа смещённого веера с большими углами излома / В. И. Гулятьев, А. Н. Булгаков, А. А. Алексеев, А. Н. Широков // 52 школа-конференция «Актуальные проблемы механики» памяти Н.Ф. Морозова, Санкт-Петербург, 23–27 июня 2025 года : Тезисы докладов конференции. — Санкт-Петербург : Издательство ВВМ, 2025. — С. 61–62. — EDN ACHJMW.
18. Булгаков, А. Н. Моделирование процессов сложного деформирования стали 45 в двумерных опытах в пространстве деформаций по ломаным траекториям / А. Н. Булгаков, В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев, А. Н. Широков // Неделя науки ФизМех : Сборник материалов Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 31 марта – 4 апреля 2025 года. — Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. — С. 221–223. — EDN IVPIAU.
19. Гулятьев, В. И. Сравнение параметров аппроксимации функционалов процессов для ортогонально отраженных траекторий деформирования / В. И. Гулятьев, С. Л. Субботин, А. А. Алексеев [и др.] // Образование и наука в развитии технологий, экономики, общества : Материалы докладов 58-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 60-летию УО "ВГТУ". В 2-х томах, Витебск, 16–17 апреля 2025 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2025. — С. 407–410. — EDN HERNPF.

20. Гультияев, В. И. Аппроксимация скалярного «нырка» напряжений при сложном деформировании по двухзвенным ломаным траекториям / В. И. Гультияев, А. А. Алексеев, А. Н. Булгаков [и др.] // Образование и наука в развитии технологий, экономики, общества : Тезисы докладов 58-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 60-летию УО "ВГТУ", Витебск, 16–17 апреля 2025 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2025. — С. 238–239. — EDN VRUNGQ.
21. Гультияев, В. И. О проверке постулата изотропии для дюралюминия В95 на плоских ломаных траекториях / В. И. Гультияев, И. А. Саврасов, А. А. Алексеев, А. Н. Булгаков // Образование и наука в развитии технологий, экономики, общества : Тезисы докладов 58-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 60-летию УО "ВГТУ", Витебск, 16–17 апреля 2025 года. — Витебск : Витебский государственный технологический университет, 2025. — С. 236–237. — EDN RAVVUV.
22. Гультияев, В. И. Моделирование поведения стали 45 при смене знака кручения и пропорциональном растяжении в процессе сложного упругопластического деформирования / В. И. Гультияев, А. Н. Булгаков, А. С. Двужилов, А. Н. Широков // Аналитическая механика, устойчивость и управление : Труды XII Международной научной Четаевской конференции, Казань, 16–20 июня 2025 года. — Казань : Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2025. — С. 32–36. — EDN UTWUQF.