

На правах рукописи



Саврасов Иван Александрович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ 45 И СПЛАВА В95**

Научная специальность 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Научный руководитель

Гультяев Вадим Иванович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги, основания и фундаменты» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

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

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита состоится «16» октября 2025 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.410.03 на базе ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 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 «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



**Алексеев
Андрей Алексеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа различных элементов механизмов может происходить при локальных пластических деформациях. Учет влияния этих деформаций на перемещение рабочих органов механизмов имеет большое значение. В связи с этим актуальность работы состоит в исследовании закономерностей упругопластического деформирования сталей и сплавов, применяемых в исполнительных механизмах.

К настоящему времени выполнено недостаточно экспериментальных исследований разнонаправленных деформаций. Одним из значимых положений теории упругопластических процессов является постулат изотропии А.А. Ильюшина и проверка достоверности постулата для сталей и сплавов.

Степень разработанности темы. Практика экспериментальных исследований тонкостенных цилиндрических оболочек показывает, что изотропные материалы и разносопротивляющиеся сплавы были мало изучены, особенно при сложном нагружении на многозвенных, криволинейных траекториях и др. Это убеждает, что полученные экспериментальные исследования численно согласуются с экспериментами других исследователей, таких как В.Г. Зубчанинов, В.И. Гультяев, И. Охаши, М. Токуда, И. Курита, Т. Сузуки, А.А. Лебедев. В отсутствие результатов экспериментальных исследований при сложном нагружении и деформировании было бы невозможно представить теорию процессов.

Целью данной работы является повышение достоверности прочностных расчётов на основе экспериментов при сложном и разнонаправленном упругопластическом деформировании конструкционных металлов, существующего теоретического подхода к решению задач сложного деформирования на основе постулата изотропии А.А. Ильюшина.

Достижение поставленной цели возможно за счёт решения **основных задач**, таких как:

1. Методика выполнения базовых экспериментальных исследовательских программ на испытательном комплексе СН-ЭВМ.
2. Экспериментальное исследование закономерностей упругопластического деформирования тонкостенных цилиндрических оболочек на примере изотропных (ст45) и разносопротивляющихся (В95) материалов при сложном нагружении на экспериментальном комплексе СН-ЭВМ.
3. Представление результатов обработки экспериментальных данных, скалярных и векторных свойств материалов в цифровом и графическом виде.
4. Проверка постулата изотропии на сложных криволинейных траекториях постоянной кривизны, получаемых при ортогональных преобразованиях вращения исходной траектории, на примере изотропных (ст45) и разносопротивляющихся (В95) материалов.

Научная новизна заключается в разработке экспериментальной методики исследования упругопластического деформирования конструкционных и разносопротивляющихся материалов при сложном нагружении. Эта методика

позволяет определить, какую теорию необходимо использовать для получения лучшей достоверности.

В отличие от простого нагружения, т.е. пропорционального изменения всех компонент внешних воздействий на испытываемый образец (перемещений, усилий), сложное нагружение характеризуется непропорциональным изменением компонент внешних воздействий.

Методика примененная в диссертации, заключается в экспериментальном исследовании напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов на тонкостенных трубчатых образцах при непропорциональном изменении продольных деформаций и углов закручивания. Результаты представлены в общепринятом для таких исследований векторном изображающем пространстве А.А. Ильюшина.

Программы деформирования образцов в экспериментах включают:

- получение экспериментальной диаграммы единой кривой деформирования при пропорциональном (простом) нагружении (растяжение, сжатие, кручение);
- получение экспериментальных зависимостей между напряжениями и деформациями при непропорциональном (сложном) деформировании по программам из нескольких прямолинейных участков (двух- и многозвенные ломаные);
- реализацию программ сложного деформирования в виде дуг окружностей.

Результаты выполненных экспериментов подтвердили общие положения теории упругопластических процессов и могут использоваться для проверки количественных результатов, получаемых по различным вариантам теории пластичности конструкционных материалов.

Практическое значение. Практическое значение данной диссертационной работы состоит в использовании её результатов в учебном процессе, внедрении их на производстве (в ООО «ПромКонтроль» и др.). Экспериментальные данные, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, интегрированы в учебный процесс, а именно в такие дисциплины, как строительная механика сооружений, теория упругости и пластичности, которые изучаются при подготовке аспирантов по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

Теоретическое значение. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при верификации математических моделей различных конструкций.

Объект исследования – цилиндрические тонкостенные оболочки из изотропного материала и разносопротивляющегося сплава, подверженные воздействию осевых переменных нагрузок и крутящего момента, а также совокупность свойств связи между напряжениями и деформациями в расчётах на прочность в конструкциях из данных материалов.

Предмет исследования – оценка напряжённо-деформируемого состояния изотропного материала и разносопротивляющегося сплава с помощью данных о векторных и скалярных свойствах и воздействия на оболочку знакопеременных нагрузок и крутящего момента.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования выполнялись по двузвенным ломаным и гладким траекториям постоянной кривизны на высокоточном экспериментально-расчётном комплексе СН-ЭВМ имени А.А. Ильюшина на кафедре сопротивления материалов, теории упругости и пластичности ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет». Точность измерения испытываемых образцов соответствует ГОСТам, методики испытаний тонкостенных оболочек полностью удовлетворяют российским стандартам. Обработка результатов экспериментов велась в соответствии с общепринятыми методиками, применяемыми при обработке результатов упругопластического деформирования образцов. В диссертации использовались математические методы механики деформируемого твёрдого тела и теории процессов.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

Основные положения научной новизны, результаты и выводы.

Достоверность полученных результатов. Результаты экспериментов, приведённые в диссертации, получены на современном испытательном комплексе СН-ЭВМ в ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», произведена верификация данных. Указанные результаты соответствуют экспериментальным данным, полученным на других материалах и в других научных школах.

Личный вклад автора состоит в конкретизации методики и планировании проведения экспериментальных исследований, в непосредственной реализации программ испытаний различных видов программ деформирования, отражённых в диссертации, в обработке, анализе полученных данных, их сравнении с результатами других исследований на основе теории процессов пластического деформирования, а также в публикациях материалов по теме диссертационной работы в различных научных изданиях.

Апробация работы. Основные результаты работы были изложены в виде докладов на научных конференциях-семинарах «Современные проблемы теории упругости и пластичности», проведенных на кафедре сопротивления материалов, теории упругости и пластичности в ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» в 2020–2023 гг. и на кафедре теории упругости в МГУ им. М.В. Ломоносова в 2023 г.; на 53-х – 58-х Международных научно-технических конференциях преподавателей и студентов в 2020–2025 гг. в УО «Витебский государственный технологический университет» (город Витебск); на IX Международном научном симпозиуме, посвященном 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчинова (г. Тверь), 2020г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 191 наименований, и приложения. В диссертации 179 страниц основного текста, в том числе 3 таблицы и 72 рисунка, а также приложение, на 68 страницах содержащее результаты экспериментов на цилиндрических оболочках и документы о внедрении.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность и указаны цели научного исследования; описаны поставленные задачи, научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов; сформулированы вопросы, выносимые на защиту.

Глава 1. Анализ развития теории пластичности и её современного состояния. Представлен исторический обзор научной литературы по теме возникновения и развития теории пластичности.

Механика деформируемого твёрдого тела до начала XX в. развивалась учёными на основе экспериментальных исследований. Многие важные законы были открыты именно экспериментальным путём.

В конце 20-х – начале 30-х гг. XX в. начинает развиваться практическая механика, связанная с экспериментальными исследованиями. В ЦАГИ (г. Москва) выполнялись эксперименты с цилиндрическими оболочками, причём данные эксперименты проводились на сложное нагружение.

Развитие теории пластичности берёт начало в первой четверти XX в. В это время А.А. Ильюшин занимался теорией процессов – новым направлением в теории пластичности. Оно стало называться общей теорией упругопластических процессов. В данной теории была рассмотрена поверхность текучести, изучено геометрическое представление процессов нагружения, деформирования в пятимерных векторных пространствах. В этих пространствах тензоры деформации и напряжений А.А. Ильюшин изобразил векторно, а также ввёл понятие «образ процессов». За основу взяли постулат изотропии, предложенный А.А. Ильюшиным, принцип запаздывания векторных свойств, теорию изоморфизма, скалярные и векторные свойства материалов, которые характеризуют интенсивность процессов. Как и Рош и Эйхиндер, А.А. Ильюшин поддерживает закон о единой кривой упрочнения. Позднее В.Г. Зубчанинов выдвинул теорию пластичности для траектории малого кручения, доказал постулат локальной размерности образа процессов и создал закон сложной разгрузки материала. Теория упругопластических процессов наглядно описывает возможность геометрического представления процесса деформирования и нагружения, а также даёт возможность экспериментально проверить основные постулаты.

В послевоенные годы теорию пластичности развивали в своих трудах А.А. Ильюшин, Е.И. Шемякин, А. Хилл, В. Койтер, Д. Друккер, В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич, В.С. Бондарь, В. Прагер, Б. Будянский, Ю.Н. Работнов, В.Д. Ключников, И.Я. Леонов, В.С. Ленский, А.С. Кравчук, В.Г. Зубчанинов, Д.Д. Ивлев, А.А. Лебедев, В.В. Москвитин, Л.А. Толоконников, Р.А. Васин, С.А. Христианович, Ю.Н. Шевченко и другие учёные. В теорию течения различных направлений с учётом сложного нагружения также большой вклад внесли Ю.И. Кадашевич, В.В. Новожилов, В.Д. Ключников, В.С. Бондарь и др.

Проблема устойчивости деформирования вязкопластических тел впервые была рассмотрена в работах А.А. Ильюшина и А.Ю. Ишлинского, также ими была предложена краевая задача устойчивости вязкопластического течения.

На современном этапе в механике деформируемого твердого тела появляется ещё одна теория – теория композитов. Созданы принципы построения новых математических соотношений, которые были определены экспериментально или из решения отдельных задач. Композитные материалы широко применяются в авиасамолётостроении, судостроении и т.д. Ведущим направлением развития механики твёрдого тела является теория течения, которой занимались Ю.И. Кадашевич, И.В. Новожилов, а также В.С. Бондарь со своими учениками. На сегодняшний день два этих направления (теория процессов и теория течения) являются основополагающими в теории пластичности.

Глава 2. Теоретические исследования постулата изотропии. Теория упругопластического деформирования материалов при сложном деформировании и нагружении была создана профессором, д.физ.-мат.наук, членом-корреспондентом АН СССР и РФ, академиком Академии артиллерийских наук А.А. Ильюшиным.

Если принять разложение компонента тензора напряжений $\sigma_{ij} = \sigma_0 \cdot \delta_{ij} + S_{ij}$, то модуль тензора напряжений и тривектора будет иметь следующий вид:

$$S^2 = 3\sigma_0^2 + \sigma^2, \quad (1)$$

где $\sigma_0 = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$; $\sigma^2 = S_{ji} \cdot S_{ij}$, величины σ_0 и σ носят названия модулей шарового тензора и тензора-девиатора напряжений (S_{ij}).

Модуль тензора и тривектор напряжений можно записать в виде

$$S = \sqrt{3\sigma_0^2 + \sigma^2}. \quad (2)$$

Для определения собственных напряжений составим уравнение, приравняв напряжение Коши (S_n):

$$S_k^3 - I_1 S_k^2 + I_2 S_k - I_3 = 0, \quad (3)$$

где $I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_0$; $I_2 = \sigma_{ii}\sigma_{ij} = 9\sigma_0^2 - S^2$, где $S^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2$;

$$I_3 = |\sigma_{ij}| = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3.$$

Если $\sigma_0 = 0$ или $S_k = \sigma_k - \sigma_0$, то характеристическое уравнение $S_k^3 - I_1 S_k^2 + I_2 S_k - I_3 = 0$ принимает другой вид, где $I_1 = 0$; $I_2 = \frac{1}{2} S_i S_j$; $I_3 = |S_{ij}|$.

Система уравнений имеет решение $S_k = \sigma_1 - \sigma_0 = \sigma \cos \varphi$, где φ – угол вида напряжённого состояния. Подставляя данное решение, получим:

$$\sigma_1 - \sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \cos \varphi; \quad \sigma_2 - \sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \varphi \right). \quad (4)$$

За основные независимые величины могут быть приняты:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_{1.1} + \sigma_{2.2} + \sigma_{3.3}) = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3); \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}; \quad \sigma_3 - \sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \cos \left(\frac{2\pi}{3} + \varphi \right). \quad (6)$$

Теория малых упругопластических процессов деформации при простом нагружении и постулат изотропии А.А. Ильюшина

А.А. Ильюшин ввёл понятие направляющих тензоров напряжений (компоненты $\frac{S_{ij}}{\sigma}$) и направляющих тензоров деформации $\left(\frac{\partial_{ij}}{\vartheta} \right)$, где $\sigma = \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ji}}$;

$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon_{ji}}$. Приравниваем эти направляющие тензоры $\left(\frac{S_{ij}}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{ji}}{\varepsilon}\right)$ и получаем определяющее соотношение

$$S_{ji} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \varepsilon_{ji}. \quad (7)$$

При сложном нагружении направляющий тензор напряжений не равен направляющему тензору деформации. В этом случае следует учесть сложность нагружения. Тогда

$$\frac{\sin \sigma_{ij}}{\sigma} \cdot \cos \varphi \neq \frac{\varepsilon_{ji}}{\varepsilon} \cdot \cos \psi; \quad (8)$$

$$S_{ij} \neq \frac{\sigma}{\varepsilon} \neq \frac{\cos \varphi}{\cos \psi} \quad (9)$$

где ψ – угол вида деформированного состояния.

Таким образом, данное соотношение показывает, что при сложном нагружении теория малых упругопластических деформаций не выполняется так же, как и постулат изотропии, в соответствии с определением постулата изотропии.

Если координатные оси остаются неизменными, но происходит ортогональное преобразование вектора \bar{S} . То в этом случае проекции вектора \bar{X}_{ij} преобразуются по закону $\bar{X}_{ij} = M_{ij} \cdot X_j$, где M_{ij} – матрица ортогонального преобразования \bar{S} . Поскольку при ортогональном преобразовании \bar{S} его длина не изменяется, то

$$\bar{X}_{ij} \cdot \bar{X}_{ij} = (m_{ij} \cdot X_{ij})(m_{jk} \cdot X_{jk}) = m_{ij} \cdot m_{ik} (X_{ij} \cdot X_{jk}) = \Delta_{jk} (X_{ij} \cdot X_{ik}), \quad (10)$$

откуда следует, что

$$m_{ij} \cdot m_{ik} = \Delta_{jk}, \text{ где } k = 1, 2, 3. \quad (11)$$

Отсюда следует соотношение, которое аналогично полученному ранее. Из сравнения формул следует, что $l_{ij} = m_{ij}$. Это означает, что все ортогональные преобразования компонент вектора напряжений совпадают с координатами вектора напряжения, а тензоры напряжения совпадают между собой. Таким образом, при ортогональном преобразовании вектора напряжений все инварианты тензора напряжений также сохраняются. Следовательно, постулат изотропии сохраняется и выполняется. Однако ранее было отмечено, что тензор и вектор напряжений обладают скалярными и векторными свойствами, при этом третий инвариант тензора напряжений изменяется, поэтому формулировка постулата изотропии не будет выполняться, кроме случая простого нагружения.

Тем не менее если изменения и влияния третьего инварианта являются слабыми, то ими можно пренебречь и считать, что постулат изотропии выражается достаточной для практики степенью точности. В этом случае рекомендуется постулат изотропии переформулировать следующим образом: связью между напряжением и деформацией при упругопластической сложной деформации, если влияние 3-го инварианта на эту связь является слабым, можно пренебречь.

Глава 3. Автоматизированный испытательный комплекс СН-ЭВМ, средства измерения, образцы, материалы. Испытания проводились на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и

пластичности ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет». Для изучения процессов сложного нагружения материалов и их структуры применялись трубчатые образцы, которые подвергались экспериментальному исследованию напряжённо-деформированного состояния цилиндрических оболочек при растяжении с кручением и внутренним давлением в пространстве деформаций и напряжений. Стальные трубчатые образцы с толщиной стенки $h = 1$ мм, радиусом срединной поверхности $R = 15,5$ мм, длиной рабочей части $l = 110$ мм подвергались деформированию. Материал образцов в достаточной степени был начально изотропен. Модуль упругости образцов составлял $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; $\sigma_T = 270$ МПа. При обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости ($\varepsilon_0 = 0$). Для оперативного качественного контроля за ходом эксперимента измерительная информация выводилась на ЭВМ. На установке СН-ЭВМ возможно проведение опытов в трёхмерном пространстве напряжений или деформаций А.А. Ильюшина. Переход из одного подпространства в другое определяется выбором параметров управления. Обмер образцов производится при помощи микрометра МК-50 ГОСТ 6507-78 (допускаемая погрешность – 0,04 мм). Имеется также специальное приспособление для замера толщины стенки образца. В качестве средства измерения осевых, окружных и сдвиговых перемещений точек оболочки в эксперименте на сложное нагружение сконструирован и применяется дифференциальный тензометр (ДТ). При помощи ДТ и боковых тензометров измеряется осевое удлинение образца на базе $50 \pm 0,1$ мм с погрешностью не более $\pm 8-10$ мкм, углом поворота $\pm 9-10$ рад, изменением радиуса оболочки 3–10 мм. Диапазон его работы: осевое перемещение ± 2 мм, угол поворота 0,25 рад, радиальное перемещение 0,6 мм. По окончании эксперимента получают распечатку на ЭВМ в редакторе Excel в виде таблиц данных.

Методика металлографических исследований. Для исследований микроструктуры были предоставлены образцы, изготовленные из стали 45 ГОСТ 1050. Образцы предварительно были подвергнуты: 1) растяжению; 2) кручению (в соответствии с методикой исследования). Исследование микроструктуры металла проводили с помощью оптического микроскопа ZEISS Axio Observer. В результате холодного пластического деформирования металл приобрёл деформационную анизотропию и упрочнялся, изменялись его физические свойства. Свойства металла изменяются тем сильнее, чем больше степень деформации. Изменения микроструктуры, вызванные пластической деформацией, не могут не отразиться на физических свойствах металлов. Экспериментальные исследования показывают, что наступлению пластической деформации стали предшествуют заметные изменения её механических свойств. С наступлением же пластической деформации свойства продолжают изменяться, но уже куда более плавно.

Глава 4. Экспериментальные исследования сложного нагружения материалов за пределом упругости.

4.1. Диаграммы деформирования изотропного материала ст45. Экспериментальные исследования выполнены на тонкостенных трубчатых образцах из материала ст45 на автоматизированном расчётно-экспериментальном комплексе СН-

ЭВМ. Основной задачей в диссертации являлась проверка достоверности постулата изотропии А.А. Ильюшина на сложных криволинейных траекториях постоянной кривизны, получаемых при ортогональных преобразованиях вращения исходной траектории. Материал образцов с достаточной степенью был начально изотропным, что было установлено в экспериментах (рис.4.1) при простых нагружениях – растяжении, сжатии, кручении и пропорциональном сжатии с кручением.

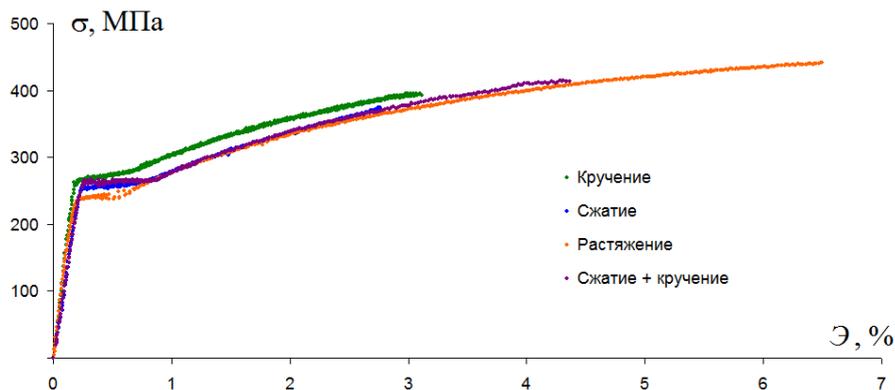


Рис. 4.1 Диаграммы деформирования $\sigma - \mathcal{E}$ при простых нагружениях ст45

При использовании векторного представления напряжений и деформаций по А.А. Ильюшину девиаторам напряжений и деформаций ставятся в соответствие векторы напряжений и деформаций формоизменения

$$\bar{\sigma} = S_k \hat{i}_k, \quad \bar{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_k \hat{i}_k \quad (k = 1, 2, 3), \quad (12)$$

где \hat{i}_k – единичные векторы базиса А.А. Ильюшина. Компоненты S_k, e_k ($k = 1, 2, 3$) векторов напряжений и деформаций в девиаторном трёхмерном пространстве А.А. Ильюшина рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}} S_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\sigma_{11} - \frac{1}{2} (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \right]; \\ S_2 &= \sqrt{2} \left(S_{22} + \frac{1}{2} S_{11} \right) = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sqrt{2}}, \quad S_3 = \sqrt{2} S_{12} = \sqrt{2} \sigma_{12}; \\ \mathcal{E}_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}} \mathcal{E}_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0), \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{2} \left(\mathcal{E}_{22} + \frac{1}{2} \mathcal{E}_{11} \right) = \frac{\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}}{\sqrt{2}}, \\ \mathcal{E}_3 &= \sqrt{2} \mathcal{E}_{12} = \sqrt{2} \varepsilon_{12}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0$, $\mathcal{E}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon_0$ – компоненты девиаторов напряжений и деформаций соответственно; δ_{ij} – символ Кронекера. Модули векторов напряжений и деформаций, равные модулям девиаторов напряжений и деформаций, определяются соотношениями:

$$\sigma = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad \mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_{ij} \mathcal{E}_{ij}} = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_2^2 + \mathcal{E}_3^2}. \quad (14)$$

4.2. Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании изотропного материала ст45 по ортогональным криволинейным траекториям постоянной кривизны. Постулат изотропии А.А. Ильюшина (как одно из основных положений теории пластичности) был экспериментально проверен для различных конструкционных материалов на разных траекториях деформирования и нагружения. Сущность постулата изотропии состоит в том, что при ортогональных преобразованиях вращения и отражения траекторий в векторном девиаторном пространстве с базисом А.А. Ильюшина образ процесса деформирования либо нагружения сохраняется, т.е. сохраняются скалярные и векторные свойства конструкционных материалов. Представлены результаты экспериментальных исследований проверки достоверности одного из основных законов пластичности – постулата изотропии А.А. Ильюшина – в условиях ортогональных сложных нагружений по криволинейным окружным траекториям постоянной кривизны. Программы деформирования реализовывались в девиаторной плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (жёсткое нагружение) при одновременном комбинированном действии на образцы растяжения-сжатия и кручения. Все четыре траектории деформирования показаны на рис. 4.2. Исходная траектория деформирования (траектория 1, красный цвет) представляет собой окружность радиуса $R = 0,75 \%$, начинающуюся из начала координат. По окружности сделан один полный оборот против часовой стрелки с приходом в начало координат. Координаты центра окружности $\mathcal{E}_1^0 = 0$, $\mathcal{E}_3^0 = 0,75 \%$, кривизна окружности $\kappa_1 = 133,3$. Ортогональные преобразования исходной траектории осуществлялись вращением против часовой стрелки на 90° (траектория 2, синий цвет), 180° (траектория 3, зеленый цвет) и 270° (траектория 4, фиолетовый цвет). При этом траектории 1 и 3, а также 2 и 4 являются кососимметричными по отношению друг к другу.

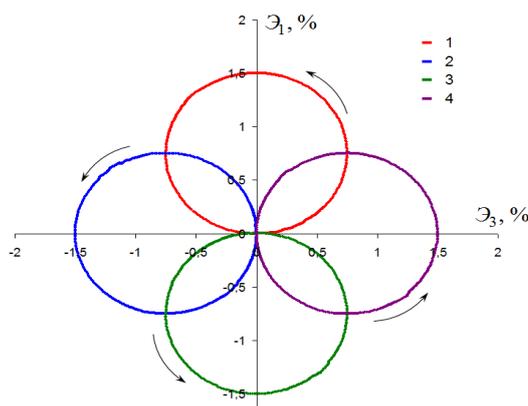


Рис. 4.2. Траектории деформирования на плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$

В теории процессов А.А. Ильюшина связь между напряжениями и деформациями определяется скалярными и векторными свойствами материалов. Скалярные свойства материала характеризуют диаграммы деформирования $\sigma - s$, где s – длина дуги траектории деформирования. На рис. 4.3 представлены совмещённые диаграммы $\sigma - s$ для всех четырёх экспериментов, а векторные свойства показаны на рис. 4.4. Видно, что все диаграммы практически совпадают.

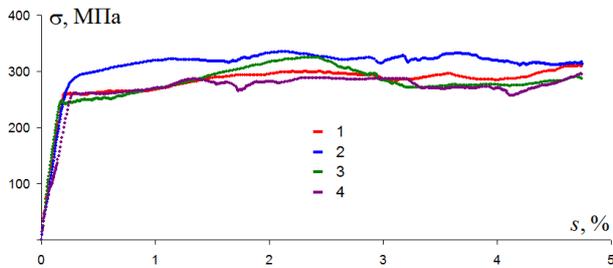


Рис. 4.3. Диаграмма деформирования $\sigma - s$

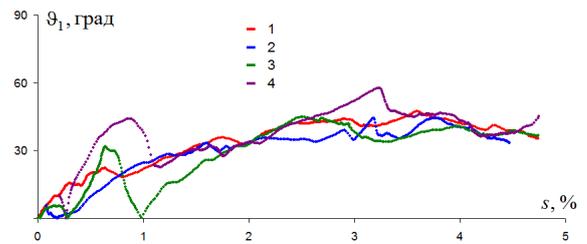


Рис. 4.4. Диаграммы $\vartheta_1 - s$

Также были проведены экспериментальные исследования изотропного материала ст45 на полуокружностях. На основе результатов можно сделать вывод, что для данной серии испытаний на трубчатых образцах постулат изотропии А.А. Ильюшина по скалярным и векторным свойствам выполняется.

4.3. Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании разносопротивляющегося сплава В95 по двузвенным ломаным траекториям.

При проверке постулата изотропии особый интерес представляют материалы, чувствительные к виду напряжённого состояния. Они по-разному сопротивляются даже при простых (пропорциональных) процессах нагружения и имеют различные кривые пластического деформирования при осевом растяжении, сжатии и кручении. При построении математических моделей теории пластичности необходимо учитывать такую чувствительность материала к виду напряжённого состояния. Основной задачей в настоящей работе являлась проверка достоверности постулата изотропии А.А. Ильюшина для алюминиевого разносопротивляющегося сплава В95 на плоских прямолинейных двузвенных ломаных траекториях деформирования. Разносопротивляющийся сплав – это алюминиевый деформируемый высокопрочный сплав, который относится к системе Al-Zn-Cu-Mg и широко используется в современной авиационной и ракетной технике. С целью построения экспериментальной диаграммы упрочнения и проверки начальной изотропии материала образцов были проведены эксперименты на простое пропорциональное нагружение при растяжении, сжатии и кручении. Диаграммы деформирования показаны на рис. 4.5.

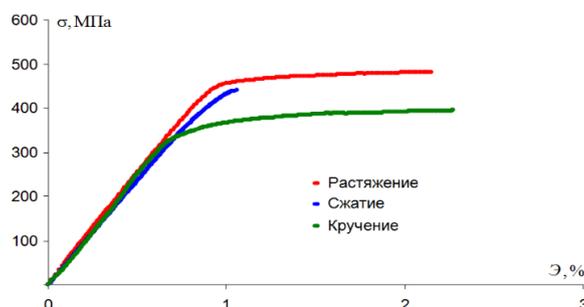


Рис. 4.5. Диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$ при простых нагружениях разносопротивляющегося сплава В95

Программы сложного деформирования реализовывались в девиаторной плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (жёсткое нагружение) при одновременном комбинированном действии на образцы осевой силы и крутящего момента ($P - M$ -опыты). Все три реализованные траектории деформирования в виде двузвенных ломаных с углами излома 90° представлены на рис. 4.6. В исходной траектории деформирования (траектория 1, красный цвет) на первом звене реализовывалось кручение до значения $\mathcal{E}_3^0 = 0,75\%$, а на втором звене осуществлялось растяжение до $\mathcal{E}_1 = 2,5\%$ при $\mathcal{E}_3 = \text{const}$. Преобразования исходной траектории осуществлялись вращением против часовой стрелки на 90° (траектория 2, синий цвет) и 180° (траектория 3, зеленый цвет). В траектории 3 на втором звене удалось достичь лишь значения $\mathcal{E}_1 \approx 1\%$, так как образец потерял устойчивость. В опытах наблюдалось появление компоненты \mathcal{E}_2 , т.е. реализованные траектории деформирования не лежали в плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$, однако значение компоненты \mathcal{E}_2 в процессе деформирования не превышало 7% от \mathcal{E} , поэтому так называемый \mathcal{E}_2 -эффект не учитывался.

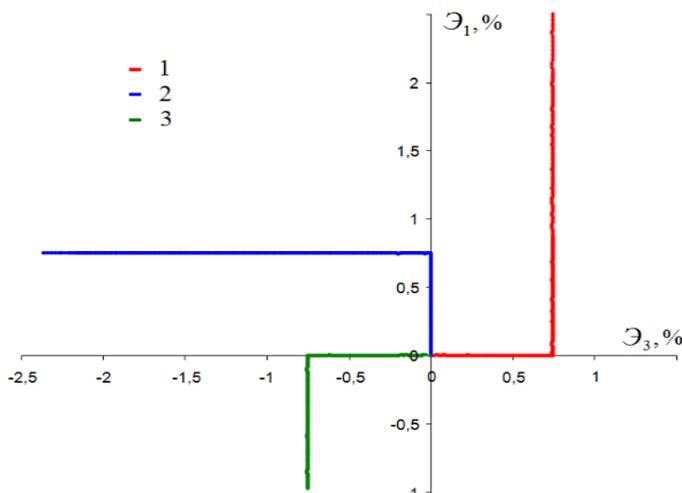


Рис. 4.6. Траектории деформирования на плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$

Скалярные свойства материала характеризуют диаграммы деформирования $\sigma - s$, где s – длина дуги траектории деформирования. На рис. 4.7 представлены совмещённые диаграммы $\sigma - s$ для всех четырёх экспериментов. На рис. 4.8 показаны совмещённые диаграммы $\mathcal{E}_1 - \Delta s$, характеризующие векторные свойства материала, где Δs – приращение длины дуги траектории деформирования после точки излома; \mathcal{E}_1 – угол, который характеризует отклонение вектора напряжений $\bar{\sigma}$ от касательной к траектории деформирования в каждой её точке. Этот угол, называемый углом сближения, отражает влияние векторных свойств материала на процесс деформирования. Из рис. 4.7 и 4.8 видно, что экспериментальные данные для всех траекторий различаются, поэтому можно сделать вывод, что для данной серии испытаний на образцах из разносопротивляющегося сплава, чувствительного к виду напряжённого состояния, имеется небольшое отклонение от постулата изотропии как по скалярным, так и по векторным свойствам.

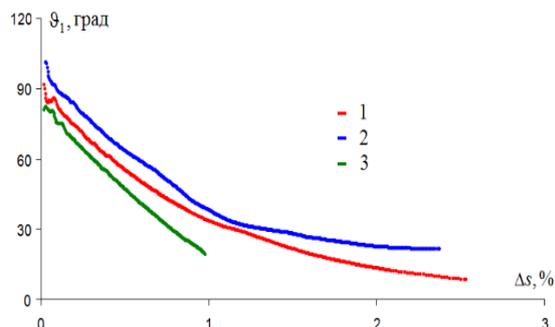
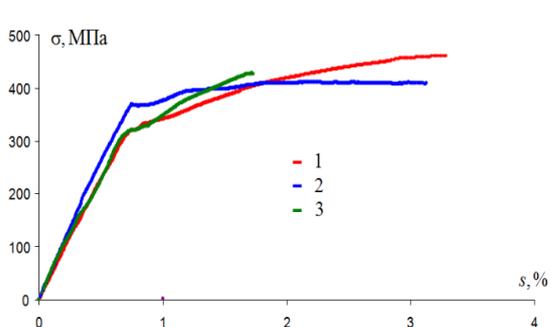


Рис. 4.7. Диаграмма деформирования $\sigma - s$

Рис. 4.8. Диаграмма углов $\Theta_1 - \Delta s$

4.4. Экспериментальное исследование постулата изотропии на плоских «треугольных траекториях». Замечено, что ортогональные нагружения вносят существенные поправки в зависимость между напряжениями и деформациями при пластическом деформировании. В связи с этим возникла идея проверки достоверности постулата изотропии на участках траекторий деформирования, ортогональных и неортогональных друг другу. Программы деформирования (рис. 4.9) представляли собой трёхзвенные ломаные в плоскости $\mathcal{E}_3 \sim \mathcal{E}_1$ при одновременном действии растяжения-сжатия и кручения. Исходная (первая) траектория реализовывалась путём кручения до $\mathcal{E} = \mathcal{E}_3 = 1,5 \%$, излома траектории на угол 135° в точке K_0 и деформирования при одновременном растяжении и кручении до точки K_1 с координатами $\mathcal{E}_1 = 2 \%$, $\mathcal{E}_3 = -0,4 \%$. Затем снова происходил излом на 135° и осуществлялось деформирование при постоянном значении $\mathcal{E}_3 = -0,4 \%$ до значения $\mathcal{E}_1 = 0$.

В точке K_2 при $\mathcal{E}_1 = 0$, $\mathcal{E}_3 = -0,4 \%$ происходил излом на 90° и реализовывалось кручение до потери устойчивости трубчатого образца. Ортогональные преобразования исходной траектории осуществлялись вращением против часовой стрелки на 90° и 180° (вторая и третья программы). Все три программы испытаний представлены на рис. 4.9.

В программе 3 по сравнению с 1 кручение на втором участке происходило в противоположном направлении, что в силу равноправности направлений по кручению несущественно для изменения структуры материала. Также растяжение в программе 1 соответствовало растяжению в программе 3. Таким образом, в плане изменения структуры программа 3 идентична 1 по отношению к исходной программе. Этим можно объяснить, что в программе 3, как и в 1, был нарушен постулат изотропии по векторным и скалярным свойствам.

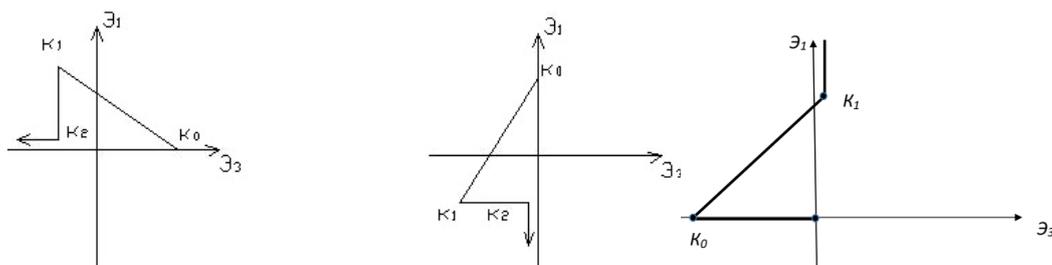


Рис. 4.9. Программы испытаний

Скалярные свойства материала характеризуют диаграммы деформирования $\sigma \sim S$ (рис. 4.10). На рис. 4.11 представлены совмещённые диаграммы углов сближения $\vartheta_1 \sim \Delta S$, характеризующие векторные свойства материала. Хорошо видно, что для представленных программ углы ϑ_1 отличаются друг от друга, и это приводит к существенному изменению структуры материала и различной деформационной анизотропии.

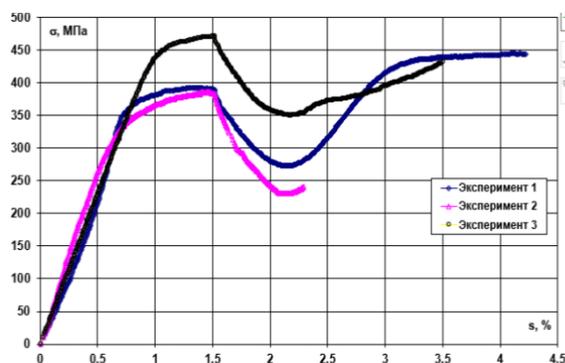


Рис. 4.10. Диаграммы прослеживания процесса $\sigma \sim S$

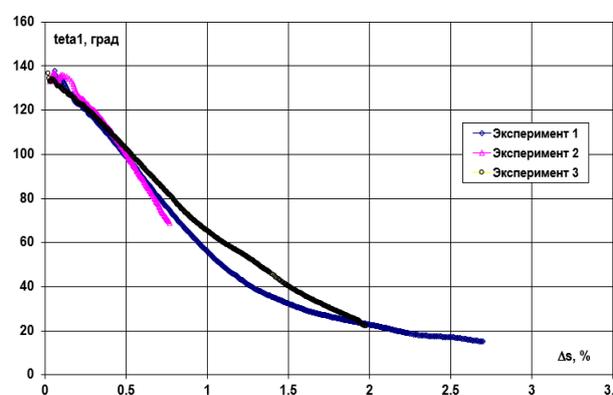


Рис. 4.11. Диаграммы углов $\vartheta_1 - \Delta S$

По скалярным свойствам прослеживается анизотропия материалов. По векторным свойствам (Рис.4.11) отличие углов сближения для отражённых траекторий на втором участке составляет примерно 10^0 . Такое расхождение углов сближения для ортогональных участков траекторий объясняется изменившейся структурой материала и возникшей деформационной анизотропией.

В диссертации не ставится под сомнение основной закон теории пластичности в целом, поскольку он выполняется в подавляющем числе случаев сложного деформирования большинства материалов. Однако следует отметить те особые случаи, когда постулат изотропии необходимо уточнять, как и говорил сам профессор А.А. Ильюшин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана программа базовых экспериментальных исследований для реализации их на автоматизированном испытательном комплексе СЧ-ЭВМ и определения внешних параметров сложного нагружения на закономерности сложного нагружения и деформирования материалов, в том числе на скалярные и векторные свойства.

2. На автоматическом комплексе СЧ-ЭВМ в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» реализовано сложное нагружение в пространстве деформаций на тонкостенных трубчатых образцах из изотропного материала ст45 и разносопротивляющегося сплава В95.

3. Результаты экспериментальных исследований скалярных и векторных свойств материалов представлены в цифровом и графическом виде.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментальная проверка постулата изотропии подтвердила его выполнение на многозвенных траекториях в условиях ортогонального и неортогонального нагружения для изотропного материала на трубчатых образцах.

2. Экспериментальная проверка постулата изотропии подтвердила его неполное выполнение на многозвенных траекториях в условиях ортогонального и неортогонального нагружения ряда траекторий для разносопротивляющегося сплава на трубчатых образцах.

3. При простом нагружении (растяжении) цилиндрического образца зёрна металла изотропного материала вытягиваются в направлении действия сил и приобретают однородную ориентацию. Это приводит к изменению функциональных свойств цилиндрических оболочек, а именно к увеличению механических характеристик изотропного материала.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований в перспективе могут быть использованы при разработке и верификации математических моделей различных теорий пластичности, оценке ресурса надёжности и прочности элементов конструкций.

СПИСОК ТРУДОВ

соискателя Саврасова Ивана Александровича

Статьи в Международных базах данных Web of Science и Scopus

1. V.I. Gultyayev, A.A. Alekseev, I.A. Savrasov, S.L. Subbotin. Experimental Verification of the Isotropy Postulate on Orthogonal Curved Trajectories of Constant Curvature // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151. P. 315–321. (Scopus)

2. Savrasov I.A., Gultiaev V.I., Alekseev A.A. Experimental Verification of the Isotropy Postulate on Orthogonal Trajectories in the Form of Semicircles // AIP Conference Proceedings. 2023. No. 2526 (1). 030012. (Scopus)

3. Savrasov I.A., Gultiaev V.I., Alekseev A.A. Experimental Study of Steel 45 Along the Strain Trajectory of the Snake Type // AIP Conference Proceedings. 2023. No. 2526 (1). 020011. (Scopus)

4. V.G. Zubchaninov, V.I. Gultyayev, A.A. Alekseev, I.A. Savrasov. Testing the Isotropy Postulate at Deformation of V95 Aluminum Alloy along Two-Link Polygonal-Chain Trajectories // Moscow University Mechanics Bulletin. 2023. No. 78 (5). P. 128–133. (WoS, Scopus)

Статьи в журналах ВАК РФ

1. В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев, И.А. Саврасов, С.Л. Субботин, В.В. Ггараников. Проверка постулата изотропии при деформировании алюминиевого

сплава В95 по прямолинейным траекториям с углом излома 135 градусов // Авиационные двигатели. № 2 (19). 2023. С. 37–42.

2. В.И. Гультияев, А.А. Алексеев, И.А. Саврасов, В.В. Гараников. Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании стали 45 по ортогональным криволинейным траекториям постоянной кривизны // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 1 (47). С. 86–94.

3. В.И. Гультияев, В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев, И.А. Саврасов. Экспериментальное исследование стали 45 по некоторой гладкой криволинейной траектории деформирования // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 3 (49). С. 33–41.

4. В.И. Гультияев, В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев, И.А. Саврасов. Проверка постулата изотропии при сложном кинематическом нагружении материала сталь 45 по траекториям деформирования в виде полуокружностей // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 4 (50). С. 16–24.

Статьи в других журналах

1. В.И. Гультияев, В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев, И.А. Саврасов. Проверка постулата изотропии в экспериментах по ортогональным траекториям деформирования в виде полуокружностей // Тезисы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. 2022. С. 246–247.

2. В.И. Гультияев, И.А. Саврасов, В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев. Экспериментальное исследование стали 45 по траектории деформирования типа «змейка» // Тезисы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. 2022. С. 247–248.

3. Саврасов И.А. Электромеханическая часть автоматизированного расчётно-испытательного комплекса СН-ЭВМ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 1 (13). С. 56–60.

4. И.А. Саврасов, В.И. Гультияев, В.Г. Зубчанинов, А.А. Алексеев. Экспериментальная проверка постулата изотропии на ортогональных криволинейных окружных траекториях // Тезисы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. 2021. С. 297–298.

5. В.И. Гультияев, В.Г. Зубчанинов, И.А. Саврасов, А.А. Алексеев. Методика экспериментального исследования пластичности поликристаллических материалов на испытательном комплексе СН-ЭВМ // Проблемы прочности,

пластичности и устойчивости в механике деформируемого твёрдого тела: материалы IX Международного научного симпозиума, посвящённого 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова / под ред. В.Г. Зубчанинова, А.А. Алексеева, В.И. Гульятеева. Тверь: ТвГУ, 2021. С. 34–36.

6. Саврасов И.А. Образцы для испытаний на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ: химический анализ, средства измерения и материалы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 86–90.

7. Гульятеев В.И., Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Булгаков А.Н., Саврасов И.А. Экспериментальные исследования цилиндрических оболочек из сплава В95 на криволинейных траекториях деформирования // Тезисы докладов 57-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Тезисы докладов. Витебск, 2024. С. 147-148.