

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 – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет»

Научный руководитель **Гультяев Вадим Иванович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильных дорог, оснований и фундаментов» ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет»

Официальные оппоненты: **Темис Юрий Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела «Математического моделирования и систем автоматизированного проектирования газотурбинных двигателей» ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Трещев Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующий кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.410.03 на базе ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» по адресу: 170026, Россия, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22, ауд. Ц-208.

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



**Алексеев
Андрей Алексеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы состоит в определении закономерностей упругопластического деформирования для стали 45 и сплава В95 в базовых экспериментах для проверки постулата изотропии.

Научная новизна состоит в проверке результатов постулата изотропии на базовых траекториях для стали 45 и сплава В95.

Степень разработанности темы состоит в анализе научной литературы по изложенной проблематике, откуда можно сделать заключение, о ее проработке. Практика экспериментальных исследований тонкостенных цилиндрических оболочек показывает, что материал сталь 45 и сплав В95 были мало исследованы, особенно при сложном нагружении на многозвенных, криволинейных траекториях и др. Это убеждает нас, что полученные экспериментальные исследования численно согласуются с экспериментами других исследователей, таких, как И. Охаши, М. Токуда, И. Курита, Т. Сузуки, Харакавал, Л. К. Гурджар, А. А. Лебедев. В отсутствие результатов экспериментальных исследований на сложное нагружение было бы невозможным представить уравнения теории процессов.

Практическое значение. Практическое и теоретическое значение данной диссертационной работы состоит в использовании в учебном процессе, внедрении на производстве в ООО «ПромКонтроль» и др. Экспериментально-теоретические исследования и экспериментальные данные, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, внедрены в учебный процесс, в такие дисциплины, как строительная механика, теория упругости, механика грунтов на кафедре «Сопrotivления материалов теории упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета для подготовки аспирантов по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела», а также для подготовки магистров по направлению 08.04.01 «Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог» кафедры «Автомобильные дороги, основания и фундаменты» Тверского государственного технического университета.

Объект исследования. Объектом исследования являются цилиндрические тонкостенные оболочки из материала сталь 45 и сплава В95, подверженные воздействию осевых переменных нагрузок и крутящего момента, а также вся совокупность свойств связи между напряжениями и деформациями в расчётах на прочность в конструкциях из данных материалов.

Предметом исследования является оценка напряженно-деформируемого состояния материалов сталь 45 и сплава В95 с помощью векторных и скалярных свойств в результате воздействия на оболочку знакопеременных нагрузок и крутящего момента.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования по двузвенным ломаным и гладким траекториям постоянной кривизны выполнялись на высокоточном, экспериментально-расчётном комплексе СЧ-ЭВМ имени А. А. Ильюшина на кафедре «Сопrotivления материалов, теории упругости и пластичности» ФГБОУ ВО «Тверской государственный

технический университет». Точность измерения испытываемых образцов соответствует ГОСТам, методики испытаний тонкостенных оболочек полностью удовлетворяют российским стандартам. Обработка экспериментов велась в соответствии с общепринятыми методиками при обработке результатов упругопластического деформирования образцов. В диссертации использовались математические методы механики деформируемого твердого тела и теории процессов.

Положения диссертации, выносимые нас защиту:

- методические рекомендации по реализации различных траекторий сложных процессов упругопластического деформирования;
- описание плоских многозвенных ломаных и криволинейных траекторий деформирования, анализ полученных экспериментальных данных;
- утверждение о том, что при рассмотрении плоских криволинейных траекторий постоянной кривизны для стали 45 постулат изотропии А. А. Ильюшина выполняется полностью, а для сплава В95 выполняется неполностью;
- выполнен сравнительный анализ векторных свойств прямолинейных и криволинейных траекторий, рассчитан угол сближения ϑ_1 , который образуется при переходе с одной траектории на другую.

Достоверность полученных результатов. Полученные результаты диссертации, выполнены на современном испытательном комплексе СН-ЭВМ в ТвГТУ и произведена верификация данных. Также, полученные результаты соответствуют экспериментальным данным, полученным на других материалах и в других научных школах.

Личный вклад автора состоит в разработке методики и планировании проведения экспериментальных исследований, непосредственной реализации программ испытаний различных видов траекторий деформирования, отражённых в диссертации, их обработке, анализе полученных данных, их сравнение с результатами других исследователей и на основании теории процессов пластического деформирования, публикациях по теме диссертационной работы в различных научных изданиях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научной конференции-семинаре «Современные проблемы теории упругости и пластичности» на кафедре сопротивления материалов, теории упругости и пластичности в ФГБОУ ВО «Тверской государственной технический университет» в 2020, 2021, 2022 и 2023 гг., в МГУ им. М. В. Ломоносова в 2023г. на кафедре теории упругости, в УО «Витебском государственном технологическом университете» (город Витебск) на 53, 54 и 55 Международных научно-технических конференциях преподавателей и студентов в 2020, 2021 и 2022гг, на IX Международном научном симпозиуме, посвященном 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н. профессора В.Г. Зубчанинова (г. Тверь), 2021г.

Целью данной работы является экспериментальное исследование закономерностей упругопластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении и проверка достоверности постулата изотропии А. А. Ильюшина на конструкционных материалах сталь 45 и сплав В95.

Экспериментальные исследования проводились на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ в лаборатории механических испытаний кафедры «Сопротивление материалов, теория упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета.

Осуществление поставленной цели реализовывалось путем постановки решения **следующих задач:**

1. Методики представления базовых экспериментальных программ для их осуществления на испытательном комплексе СН-ЭВМ.
2. Экспериментального исследования закономерностей упругопластического деформирования стали 45 и сплава В95 при сложном нагружении на цилиндрических образцах на экспериментальном комплексе СН-ЭВМ.
3. Представления результатов обработанных экспериментальных данных, скалярных и векторных свойств материалов в цифровом и графическом виде.
4. В условиях ортогонального и не ортогонального нагружения проверки постулата изотропии для стали 45.
5. В условиях ортогонального и не ортогонального нагружения проверки постулата изотропии для сплава В95.
6. Экспериментального исследования деформационной анизотропии и структуры стали 45 при упругопластическом деформировании.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 189 наименования и приложения. Диссертация содержит 216 страниц основного текста, в том числе 3 таблицы, 72 рисунка и приложения на 102 страницах содержащего результаты расчета цилиндрических оболочек, а также документы о внедрении.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представляется обоснование актуальности и цели выполненного научного исследования, описание поставленных задач, научной новизны, практической значимости и достоверности полученных результатов в диссертационной работе. Формулируются вопросы, выносимые на защиту.

Глава 1. Исторический обзор развития теории пластичности и ее современное состояние. Представлен исторический обзор научной литературы по возникновению и развитию теории пластичности. Прочность отдельных материалов была известна еще с античных времен. Однако, только с V века до н. э. начинает даваться научное обоснование прочностным свойствам материалов в строительстве. Древние ученые, уже в то время могли рассчитать грузоподъемность своих кораблей, прочность отдельных конструкций сооружений, механизмов. Во II веке до н. э. в своем знаменитом труде-энциклопедии «10 книг об архитектуре» Витрувий показал, как можно построить город, акведук, представил различные строительные технологии, конструкции зданий и сооружений, где и как применять строительные материалы: глиняный кирпич, известь, глину, песок, стекло. Данный труд имел большой успех в Европе и в Средневековье, даже через две тысячи лет, поэтому переводился

вплоть до 18 века. Но прочностные, упругие и пластические свойства материалов не учитывались.

В 16 веке известный художник Леонардо да Винчи, который также был математиком, механиком, инженером впервые начал эксперименты по исследованию прочности материалов. Этот период характеризуется развитием строительной механики. Именно он предсказал появление в дальнейшем подводной лодки, экскаватора, телеграфа и даже телефона. Он провел эксперименты по растяжению струн и волокон. В 17 веке Гук открывает зависимость между нагрузкой и деформацией на основе экспериментальных исследований растяжения пружины, Ньютон публикует свой труд «Математические начала натуральной философии», а затем и три закона, т. е. начинается развитие математики, физики и как следствие науки о прочности. Через сто лет Т. Юнг открыл главную зависимость сопротивления материалов: напряжение/деформацию = const, а далее сделал вывод, что эта зависимость присуща всем материалам. Эта константа имеет название модуля Юнга, так, например для стали он равен $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, для дюралей $E = 0,75 \cdot 10^5$ МПа и т.д. Как любая константа E описывает жесткость материала. Эту величину Юнг назвал модулем упругости (модуль Юнга). Она и сегодня входит в основной закон теории упругости - закон Гука.

Немаловажную роль в науке, в первой половине 19 в. сыграли французские ученые Пуассон, Коши, Навье. Механики-теоретики обратились к предельным величинам напряжений. Они исследовали предельные значения напряжений в пределах упругости. Это и стало основным толчком развития теории упругости, а также теории пластин и оболочек. В первой половине 19 века Коши выводит свои основные уравнения теории упругости, которые до сих пор изучаются в высших учебных заведениях. Он изучал тело маленьких размеров и сделал вывод, что на всех его гранях должны быть уравновешивающие силы, т. е. тело должно находиться в равновесии. Чуть позже, Навье, Коши и Пуассон доказали, что в теории три уравнения равновесия Коши необходимы и достаточны для определения напряжений в твердом теле. В дальнейшем Сен-Венан развил механику твердого тела, теорию упругости и развил теорию кручения призм. Им также был открыт в сопротивлении материалов принцип, получивший его имя. В начале XX в. работы Сен-Венана продолжили Р. Мизес, Л. Прандтль, а затем – А. Надаи, Д. Друккер и др.

В это время, в России (конец XIX в.), появляется своя научная школа, в которой исследования касательных напряжений проводит Н. И. Журавский. И связано это, прежде всего, со строительством железной дороги Санкт-Петербург-Москва. В XIX в. и начале XX в. происходит большое количество аварий, связанных с разрушением валов морских судов, металлических конструкций. Исследования показали, что разрушения начинаются с микротрещины, зародившейся в глубине конструкции и развивающейся к ее поверхности по всей окружности. Поэтому, подход к материалу, как абсолютно сплошному, не соответствует истине, а соответственно необходим новый, более прогрессивный подход. К тому же возникла необходимость учета пластических деформаций и деформаций ползучести.

Развитие теории упругости приводит к появлению еще одного нового раздела - теории упругости и пластичности. В настоящее время имеется большое количество математического описания с помощью определяющих соотношений пластических сред, т. е. моделирования деформации сплошной среды - феноменологический подход.

Итак, механика деформируемого твердого тела до начала XX в. развивалась, как на основе опыта ученых, так и проводимых экспериментальных исследований. Многие экспериментальные законы были открыты чисто экспериментально, путем повторения отдельных явлений. И этот опыт передавался от поколения к поколению, тем самым развивая науку под названием механика.

В конце 20-х – начале 30-х годов XX в. начинает развиваться практическая механика, связанная экспериментальной частью. В г. Москве, в ЦАГИ начинают выполнять эксперименты с цилиндрическими оболочками. Причем данные эксперименты проводились на сложное нагружение.

Развитие теории пластичности начинается в первой четверти XX века. В это время А. А. Ильюшин начинает развитие теории процессов – новое направление в теории пластичности. Оно стало называться общей теорией упругопластических процессов. В этой теории была рассмотрена поверхность текучести, было рассмотрено геометрическое представление процессов нагружения, деформирования в пятимерных векторных пространствах. В этих пространствах тензоры деформации и напряжений А. А. Ильюшин изобразил векторно, а также ввел понятие – образ процессов. За основу был использован постулат изотропии, предложенный А. А. Ильюшиным, принцип запаздывания векторных свойств, теория изоморфизма, скалярные и векторные свойства материалов, которые характеризует интенсивность процессов. Как и Рош и Эйхтер, А. А. Ильюшин поддерживает закон о единой кривой упрочнения. Позднее В. Г. Зубчанинов выдвинул теорию пластичности для траектории малого кручения, доказал постулат локальности размерности образа процессов и создал закон сложной разгрузки материала. Теория упругопластических процессов достаточно наглядно описывает возможность геометрического представления процесса деформирования и нагружения, а также даёт возможность экспериментальной проверки основных постулатов.

В послевоенные годы теорию пластичности развивали в своих трудах А. А. Ильюшин, Е. И. Шемякин, Хилл, Койтер, Друккер, В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашевич, В. С. Бондарь, Прагер, 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 др. ученые. В теорию течения различных направлений с учетом сложного нагружения, также большой вклад внесли Ю. И. Кадашевич, В. В. Новожилов, В. Д. Ключников, В. С. Бондарь и другие ученые.

Проблема устойчивости деформирования вязкопластических тел, впервые были рассмотрены в работах А. А. Ильюшина и А. Ю. Ишлинского, так же им была предложена краевая задача устойчивости вязкопластического течения.

На современном этапе, в механике деформируемого твердого тела, появляется еще одна теория - теория композитов. Были созданы принципы построения новых математических соотношений, которые были найдены экспериментально или из решения отдельных задач. Композитные материалы широко применяются в авиасамолетостроении, судостроении и т. д. Ведущим направлением развития механики твердого тела является Теория течения, которую развивали Ю. И. Кадашевич, Новожилов А. И., а так же Бондарь В.С. со своими учениками. На сегодняшний день эти два направления - теория процессов и теория течения являются основополагающим и конкурирующими в теории пластичности.

Глава 2. Теоретические исследования постулата изотропии. Теория упругопластического деформирования материалов при сложном деформировании и нагружении была создана профессором д.т.н. членом-корреспондентом АН СССР и РФ 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 вид:

$$S^2 = \sigma + \sigma_{ji} = 3\sigma_0^2 + \sigma^2 \quad (1)$$

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 девиатора напряжений (S_{ij}).

Модуль тензора и тривектора напряжений можно записать в виде:

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

$$\bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3, \quad (3)$$

где \bar{S}_1 - первая колонка тензора напряжений,

\bar{S}_2 - вторая колонка тензора напряжений,

\bar{S}_3 - третья колонка тензора напряжений.

$$S^{(3)} = \sqrt{3\sigma_0^2 + \sigma^2 \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

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

$$S_k^3 - I_1 S_k^2 + I_2 S_k - I_3 = 0 \quad (5)$$

где $I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_0$

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

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

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 - над углом вида напряженного состояния. Подставляя данное решение, мы получим:

$$\sigma_1 - \sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \cos \varphi \quad \sigma_2 - \sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \varphi \right) \quad (6)$$

За основные независимые инварианты могут быть приняты:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{1.1} + \sigma_{2.2} + \sigma_{3.3} = \left(\frac{1}{3} \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \right) \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad \sigma_3 - \sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \quad (8)$$

Теория малых упругопластических процессов деформации при простом нагружении и постулате 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 $\sigma = \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ij}}$, $\vartheta = \sqrt{\partial_{ij} \cdot \partial_{ij}}$ эти направляющие тензора приравниваем $\left(\frac{S_{ij}}{\sigma} = \frac{\partial_{ji}}{\vartheta}\right)$ получили определяющее соотношение:

$$S_{ji} = \frac{\sigma}{\vartheta} \partial_{ji} \quad (9)$$

При сложном нагружении направляющие тензоры $S_{ij} \cdot \sigma$, S_{ji} не равны направляющему тензору деформации. В этом случае следует учесть сложность нагружения путём умножения направления. Для этого следует направляющие тензоры при простом нагружении $\chi \cos$ углов φ и $\cos \psi$; в связи с изменением их направлений:

$$\frac{\sin \sigma_{ij}}{r} \cdot \cos \varphi \neq \frac{\partial_{ji}}{\vartheta} \cdot \cos \psi, \quad (10)$$

$$S_{ij} \neq \frac{\sigma}{\vartheta} \neq \frac{\cos \varphi}{\cos \psi}. \quad (11)$$

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

Предположим теперь, что координатные оси остаются неизменными, но происходит ортогональное преобразование \bar{S} . В этом случае проекции вектора \bar{X}_{ij} преобразуются по закону $\bar{X}_{ij} = M_{ij} \cdot X_j$, где M_{ij} - есть матрица ортогонального преобразования \bar{S} , т.к, при ортогональном преобразование \bar{S} его длина не изменяется, то:

$$\bar{X}_{ij} \cdot \bar{X}_{ij} = (m_{ij} \cdot X_{ij})(R_{jk} \cdot X_{jk}) = m_{ij} \cdot m_{ij}(X_{ij} \cdot X_{jk}) = \Delta_{jk}(X_{ij} \cdot X_{ik}) \quad (12)$$

откуда следует, что:

$$m_{ij} \cdot m_{ik} = \Delta_{jk} \text{ где } k=1,2,3 \quad (13)$$

Тогда, мы получим 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 компоненты (все) вектора напряжения и тензора напряжения совпадают между собой. Это означает что при ортогональном преобразовании вектора напряжений все инварианты тензора напряжений также сохраняются, т. о. 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 и поэтому формулировка постулата изотропии не будет выполняться, кроме случая простого нагружения.

Однако если изменения и влияния третьего инварианта являются слабыми то, этим влиянием 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 слабой, то ею 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 Тверского государственного технического университета. Для исследования процессов сложного нагружения материалов и их структуры, в качестве образцов применялись трубчатые образцы, которые подвергались экспериментальному исследованию напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при растяжении с кручением и внутренним давлением (рис.3.1) 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 выводится на ЭВМ. На установке СН возможно проведение опытов в трехмерном 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 0,04мм). 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 осевое удлинение образца на базе $50 \pm 0,1$ мм измеряется с погрешностью не более $\pm 8-10$ мкм, угла поворота $\pm 9-10$ рад, изменение радиуса оболочки 3–10 мм. Диапазон его работы - осевое перемещение ± 2 мм, угол поворота 0,25 рад, радиальное перемещение 0,6 мм. По окончании опыта 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. Вырезка образцов осуществлялась абразивным способом на отрезной установке, выполненной на базе углошлифовальной машинки BOSCH GWS 11–125. Исследование микроструктуры металла проводили с помощью оптического микроскопа ZEISS Axio Observer. В результате холодного пластического деформирования металл

приобретает деформационную анизотропию и упрочняется, изменяются 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 ее механических свойств. С наступлением же пластической деформации свойства продолжают изменяться, но уже значительно более плавно.

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

4.1 Диаграммы деформирования материала сталь 45.

Экспериментальные исследования выполнены на тонкостенных трубчатых образцах из материала сталь 45 на автоматизированном расчетно-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 при простых нагружениях – растяжении, сжатии, кручении и пропорциональном сжатии с кручением

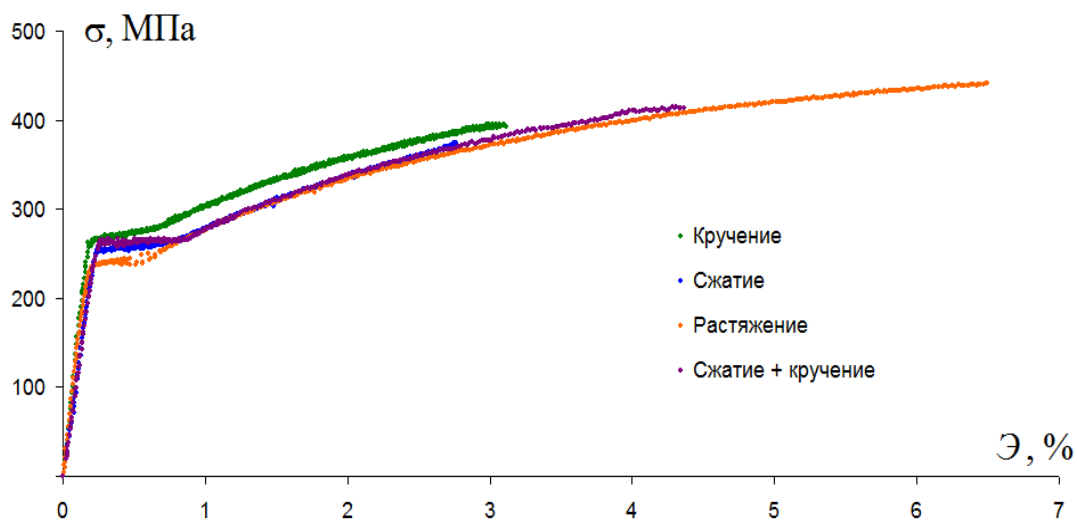


Рис.4.1

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

$$\bar{\sigma} = S_k \hat{i}_k, \quad \bar{\varepsilon} = \mathcal{E}_k \hat{i}_k \quad (k = 1, 2, 3), \quad (4.1)$$

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 трехмерном пространстве А. А. Ильюшина, рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}} S_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\sigma_{11} - \frac{1}{2} (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \right], \\ S_2 &= \sqrt{2} \left(S_{22} + \frac{1}{2} S_{11} \right) = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sqrt{2}}, \quad S_3 = \sqrt{2} S_{12} = \sqrt{2} \sigma_{12}, \\ \mathcal{E}_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}} \mathcal{E}_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0), \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{2} \left(\mathcal{E}_{22} + \frac{1}{2} \mathcal{E}_{11} \right) = \frac{\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}}{\sqrt{2}}, \\ \mathcal{E}_3 &= \sqrt{2} \mathcal{E}_{12} = \sqrt{2} \varepsilon_{12}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

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

$$\sigma = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad \mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_{ij} \mathcal{E}_{ij}} = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_2^2 + \mathcal{E}_3^2}. \quad (4.3)$$

4.2 Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании стали 45 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 о проверке 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 $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (жесткое нагружение) при одновременном комбинированном действии на образцы растяжения-сжатия и кручения. Все четыре траектории деформирования представлены 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 хода часовой стрелки с приходом в начало координат. Координаты центра окружности $\mathcal{E}_1^0 = 0$, $\mathcal{E}_3^0 = 0.75\%$, кривизна окружности $\kappa = 133.3$. Ортогональные преобразования исходной траектории осуществлялось 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.

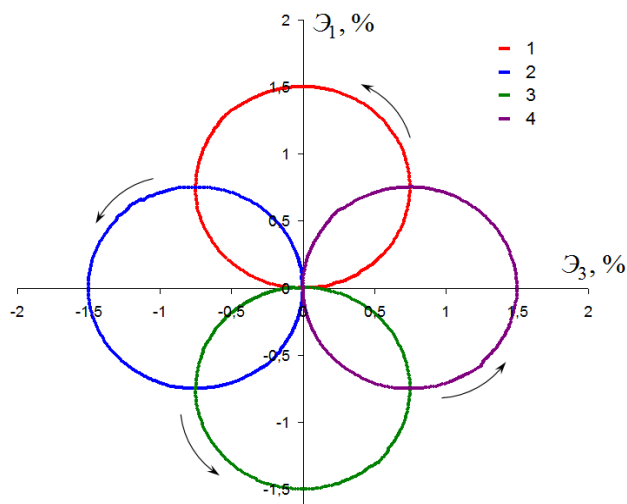


Рис. 4.2. Траектории деформирования на плоскости $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$.

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 совмещенные диаграммы $\sigma - s$ для всех четырех экспериментов, а векторные на рис.4.4. Видно, что все диаграммы практически совпадают.

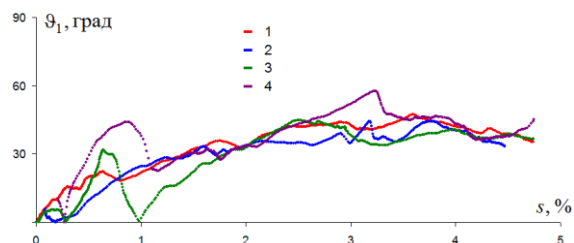
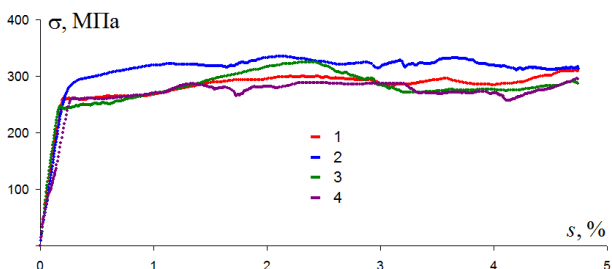


Рис. 4.3 Диаграмма деформирования $\sigma - s$ Рис. 4.4 Диаграммы $\theta_1 - s$

Также были проведены экспериментальные исследования для стали 45 на полуокружностях. По результатам экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что для данной серии испытаний постулат изотропии А. А. Ильюшина по скалярным и векторным свойствам выполняется.

4.3 Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании сплава В95 по двузвенным ломаным траекториям. При проверке постулата изотропии особый интерес представляют материалы, чувствительные к виду напряженного состояния. Такие материалы по-разному сопротивляются даже при простых (пропорциональных) процессах нагружения и имеют заметно различные кривые пластического деформирования при осевом растяжении, сжатии и кручении. При построении математических моделей теории пластичности необходимо учитывать такую чувствительность материала к виду напряженного состояния. Основной задачей в данной работе являлась

проверка достоверности постулата изотропии А. А. Ильюшина для алюминиевого сплава В95 на плоских прямолинейных двузвенных ломаных траекториях деформирования. Сплав В95 – 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

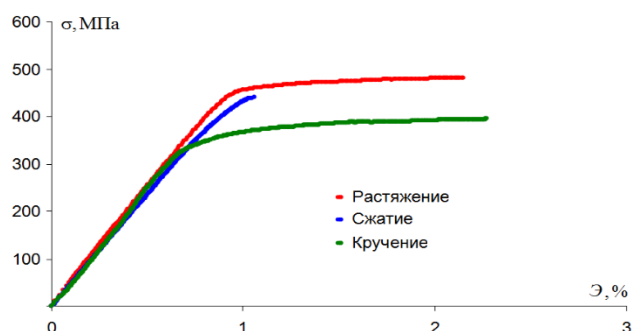


Рис. 4.5 Диаграммы деформирования $\sigma - \mathcal{E}$ при простых нагружениях сплава В95

Программы сложного деформирования реализовывались в девиаторной плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (жесткое 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 осуществлялось 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 , то есть 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.

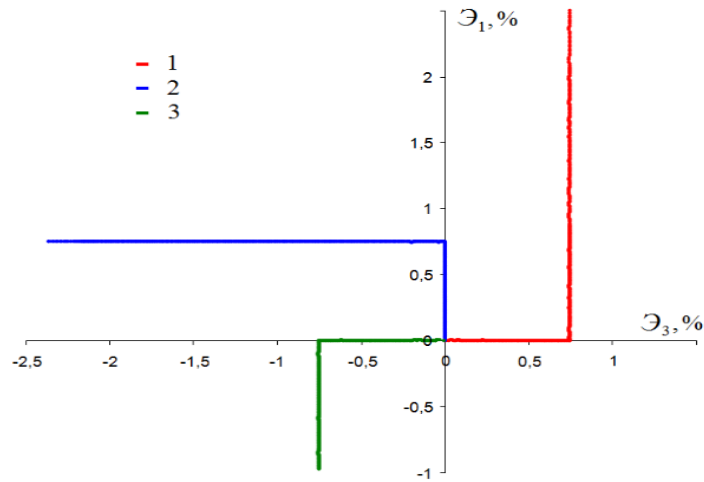


Рис. 4.6 Траектории деформирования на плоскости $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$

Скалярные свойства материала характеризуют диаграммы деформирования $\sigma - s$, где s – длина дуги траектории деформирования. На рис. 4.7 представлены совмещенные диаграммы $\sigma - s$ для всех четырех экспериментов. На рисунке 4.8 представлены совмещенные диаграммы $\vartheta_1 - \Delta s$, характеризующие векторные свойства материала, где Δs – приращение длины дуги траектории деформирования после точки излома, ϑ_1 – угол, который характеризует отклонение вектора напряжений $\bar{\sigma}$ от касательной к траектории деформирования в каждой ее точке. Этот угол, называемый углом сближения, отражает влияние векторных свойств материала на процесс деформирования.

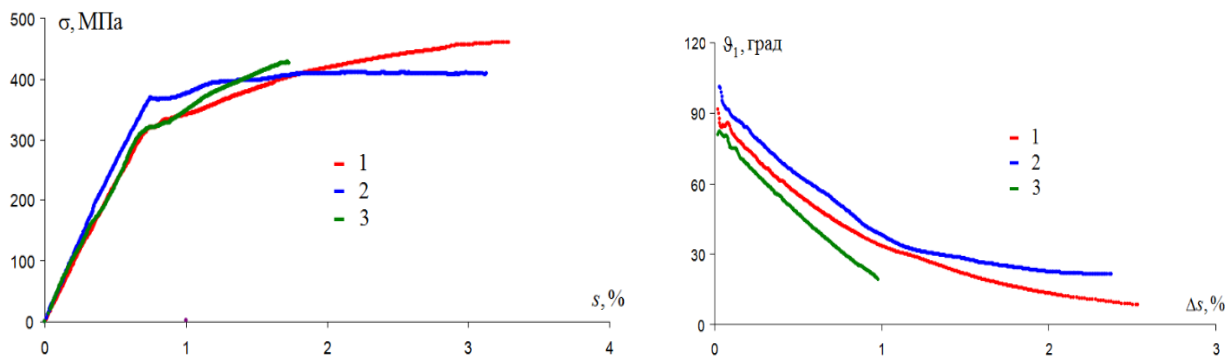


Рис. 4.7 Диаграмма деформирования $\sigma - s$. Рис. 4.8 Диаграмма $\vartheta_1 - \Delta s$.

Из рисунков 4.7 и 4.8 видно, что экспериментальные данные для всех траекторий различаются достаточно существенно, поэтому можно сделать вывод о том, что для данной серии испытаний на образцах из сплава В95, чувствительного к виду напряженного состояния, имеется небольшое отклонение от постулата изотропии, как по скалярным, так и векторным свойствам.

4.6. 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 о проверке достоверности постулата изотропии на участках траекторий деформирования

ортогональных и неортогональных друг другу. Программы деформирования рис.4.9 представляли собой трехзвенные ломаные в плоскости $\mathcal{E}_3 \sim \mathcal{E}_1$ при одновременном действии растяжения-сжатия и кручения. Исходная (первая) траектория реализовывалась путем 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 осуществлялось вращением против часовой стрелки на 90° и 180° (вторая и третья программы). Все три программы испытаний представлены на рис. 4.30

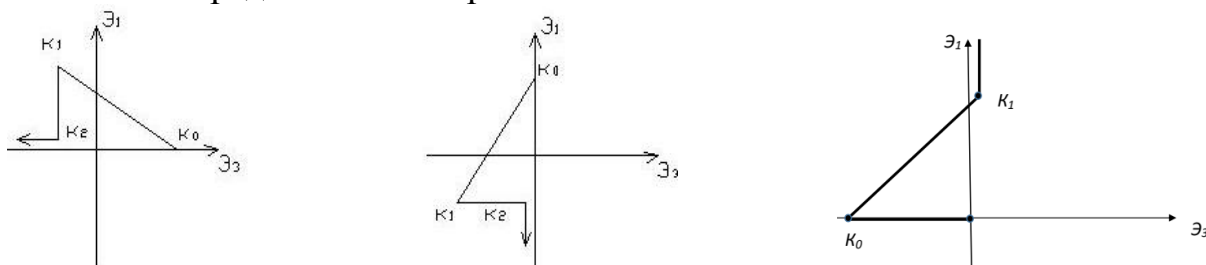


Рис. 4.9 Программы испытаний

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, по изменению структуры программа 3 идентична 1 по отношению к исходной программе. Этим можно объяснить, что в программе 3, как и 1, был нарушен постулат изотропии по векторным и скалярным свойствам.

Скалярные свойства материала характеризуют диаграммы деформирования $\sigma \sim S$ (рис.4.10). На рис.4.11 представлены совмещенные диаграммы углов сближения $\mathcal{G}_1 \sim \Delta S$, характеризующие векторные свойства материала. Хорошо видно, что для представленных программ углы \mathcal{G}_1 резко отличаются друг от друга, что приводит к существенно различному изменению структуры материала и различной деформационной анизотропии.

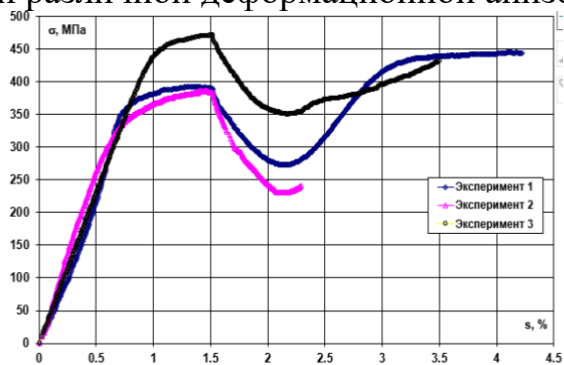


Рис.4.10 Диаграммы прослеживания процесса $\sigma \sim S$

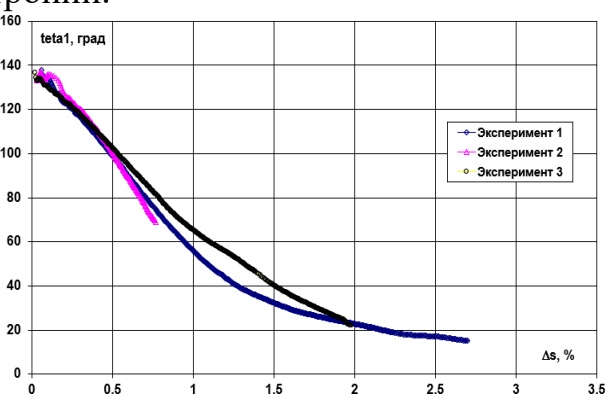


Рис.4.11. Диаграммы $\mathcal{G}_1 - \Delta s$

По скалярным свойствам прослеживается анизотропия материалов. По векторным свойствам: отличие углов сближения для отраженных траекторий на втором участке составляет примерно 10° . Такое расхождение углов сближения для ортогональных участков траекторий объясняется отличием изменившейся структуры 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 автор д.т.н. профессор А. А. Ильющин.

Результаты и выводы

1. Разработана программа базовых экспериментальных исследований по реализации на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ для определения внешних параметров сложного нагружения на закономерности сложного нагружения и деформирования материалов в том числе на скалярные и векторные свойства.
2. На автоматическом комплексе СН-ЭВМ в ТвГТУ реализовано сложное нагружение в пространстве деформаций на тонкостенных трубчатых образцах сталь 45 и сплава В95.
3. Результаты экспериментальных исследований скалярных и векторных свойств материалов представлены в цифровом и графическом виде.
4. Экспериментальная проверка постулата изотропии подтвердила его выполнение на многозвенных траекториях в условиях ортогонального и неортогонального нагружения для стали 45.
5. Экспериментальная проверка постулата изотропии подтвердила его неполное выполнение на многозвенных траекториях в условиях ортогонального и неортогонального нагружения ряда траекторий для сплава В95.
6. При простом нагружении (растяжении) цилиндрического образца, зерна металла сталь 45 вытягиваются в направлении действия сил и приобретают однородную ориентацию. Такое влияние приводит к изменению функциональных свойств цилиндрических оболочек, а именно к увеличению механических характеристик стали 45.
7. Результаты выполненных экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке и верификации математических моделей теории пластичности, оценке ресурса и надежности элементов конструкций.

**Список трудов
соискателя Саврасова Ивана Александровича**

Статьи в Международных базах данных Web of Science и Scopus.

1. Savrasov I.A. Experimental verification of the isotropy postulate on orthogonal curved trajectories of constant curvature / Gulyaev V.I., Alekseev A.A., Savrasov I.A., Subbotin S.L. // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Т. 151 LNCE. С. 315–321.

Статьи в журналах ВАК РФ

1. Саврасов И.А. Проверка постулата изотропии при деформировании алюминиевого сплава В95 по прямолинейным траекториям с углом излома 135 градусов / Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А., Саврасов И.А., Субботин С. Л., Гараников В.В. // Авиационные двигатели. №2 (19). 2023. С.37-42.

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

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

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

Статьи в других журналах:

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

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

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

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

5. Саврасов И.А. Методика экспериментального исследования пластичности поликристаллических материалов на испытательном комплексе СН-ЭВМ / Гультяев В.И., Зубчанинов В.Г., Саврасов И.А., Алексеев А.А.// В сборнике: Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы IX Международного научного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г.Зубчанинова. Под редакцией В.Г.Зубчанинова, А.А. Алексеева, В.И. Гультяева. Тверь, 2021. С.34-36.

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