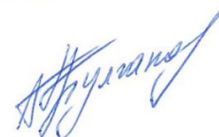


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тверской государственный технический университет»

На правах рукописи



Булгаков Александр Николаевич

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

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гультияев Вадим Иванович

Тверь – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ИСТОРИКО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИСОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ.....	13
1.1. Становление науки о деформировании твердых тел, упругости и пластичности.....	13
1.2. Современные теории пластичности	22
1.3. Экспериментальные исследования по установлению закономерностей упругопластического деформирования материалов, актуальные вопросы и перспективы	27
1.4. Запаздывание векторных и скалярных свойств материалов	30
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....	35
2.1. Образы процессов нагружения и деформирования.....	35
2.2. Критерии состояний процессов деформирования и нагружения.....	40
2.3. Теория малых упругопластических деформаций, постулат изотропии и принцип запаздывания при простом нагружении	42
2.4. Методика обработки результатов экспериментов	47
2.5. Математическое представление функционалов пластичности и аппроксимация процесса деформирования	49
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	57
3.1. Описание установки для изучения поведения материалов за пределом упругости при сложном нагружении	57

3.2. Планирование эксперимента: выбор материала, описание образцов и условий проведения опытов.....	66
3.3. Методы верификации экспериментальных данных	73
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	81
4.1. Проверка начальной изотропии материала	81
4.2. Эксперименты по типу пропорционально смещённого на 1% веера ...	86
4.3. Эксперименты по типу пропорционально смещённого на 2 % веера ..	94
4.4. Эксперименты с большими углами излома по типу пропорционально смещённого на 1 % веера	101
ГЛАВА 5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕКТОРНЫХ И СКАЛЯРНЫХ СВОЙСТВ, ФУНКЦИОНАЛОВ ПЛАСТИЧНОСТИ	107
5.1. Аппроксимация экспериментальных диаграмм деформирования.....	107
5.2. Моделирование процесса деформирования	116
5.3. Определение длины следов запаздывания скалярных и векторных свойств.....	131
5.4. Изучение функционалов пластичности	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	146
Приложение А. Технический акт внедрения (обязательное)	172
Приложение Б. Акт внедрения в учебный процесс (обязательное).....	173
Приложение В. Экспериментальные данные	174
Приложение Г. Химический анализ стали	227
Приложение Д. Сертификат качества стали.....	228

ВВЕДЕНИЕ

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 ломаных 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 технический 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. Используемые 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.

ГЛАВА 1. ИСТОРИКО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

1.1. Становление науки о деформировании твердых тел, упругости и пластичности

Начиная с древних философов и до современных исследователей, наука о деформировании твердых тел претерпела значительное развитие, связанное с поиском универсальных законов, методов, представлений и понятий. Фундаментальность данной темы обусловлена её прямым практическим значением для создания новых материалов, разработки технологий и решения конкретных задач, стоящих перед человечеством.

Основы механики закладывались многими философами, учеными, инженерами на протяжении десятков веков. История механики упругих тел начинается с опубликованной в 1638 году книги Галилео Галилея (1564–1642) «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению» [19]. Другой важный труд, «О восстановительной способности или об упругости» [145], посвященный упругим свойствам материалов, принадлежит Роберту Гуку (1635–1703). Закон о линейной зависимости между напряжениями и деформациями в упругом теле сформулирован им значительно раньше. Ещё в 1660 году в своем трактате «An Attempt for the explication of the Phenomena» Гук намекал на открытый им принцип и активно использовал его в своих запатентованных изобретениях.

Сильнейшее влияние на развитие механики оказал Леонард Эйлер (1707–1783). Он не только усовершенствовал математический анализ, дифференциальное и интегральное исчисление, но и заложил фундамент механики твердого тела. Параллельно с Эйлером работали Жан Лерон Д’Аламбер (1717–1783), который впервые свел задачи динамики к задачам статики путем составления дифференциальных уравнений движения

материальных систем, и Жозеф Луи Лагранж (1736–1813), трудившийся в области вариационного исчисления. Лагранжево и эйлерово представления движения сплошной среды до сих пор являются основой механики сплошных сред.

Значительный вклад в механику упругих тел внес Шарль Огюстен Кулон (1736–1806), известный прежде всего как автор закона взаимодействия электрических зарядов. Он проводил эксперименты по сжатию, растяжению, изгибу и кручению материалов, разработал теорию, описывающую взаимоотношения между напряжением и деформацией. Результаты были опубликованы в 1784 году [136].

Важная работа, сделанная Томасом Юнгом (1773–1829), в силу разных причин не получила должного внимания современников, но была оценена его преемниками. Было много других личностей, которые внесли значительный вклад в становление науки о твердых телах и заложили основу современного понимания механического поведения твердых тел.

На заре XIX века теория сопротивления материалов давала возможность расчета напряжений и прогибов исходя из предположения о том, что материал подчиняется закону Гука, а поперечные сечения остаются плоскими в процессе деформирования. Дальнейшее развитие науки и техники требовало более глубокого обоснования механики упругого тела.

Формирование базовых принципов механики упругого тела в первой половине XIX столетия тесно связано с инженерами и учеными, вышедшими из стен Парижской политехнической школы: Симеоном Дени Пуассоном (1781–1840), Огюстеном-Луи Коши (1789–1857), Луи Мари Анри Навье (1785–1836) и др.

Датой зарождения современной теории упругости можно считать 1821 год, когда Навье впервые вывел уравнения равновесия и движения упругих твердых тел, заложив тем самым фундамент математической теории упругости [185].

Дальнейшим серьезным продвижением вперед в области теории упругости мы обязаны главным образом трудам О. Коши [112]. После изучения доклада [168], представленного Навье в академию наук 14 мая 1821 года, Коши вместо того, чтобы опираться на молекулярные силы, действующие между индивидуальными частицами, вводит понятия деформации и напряжения, весьма упростив таким образом вывод основных уравнений [112].

Понятие напряжения было введено через понятие давления на плоскость, знакомое Коши из гидродинамики, при этом данное давление уже не является нормальным к плоскости, на которую оно действует, а состоит из нормальной и касательной составляющих. Полное давление на бесконечно малый элемент плоскости, взятой внутри деформированного упругого тела, определяется как результирующая всех воздействий. Делением полного давления на площадь элемента Коши получает величину напряжения [105].

Изучая равновесие бесконечно малого параллелепипеда, находящегося под воздействием внешних сил, Коши вывел дифференциальные уравнения равновесия [105]:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + R_j = 0, \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1.1)$$

где R_j – проекции объемных сил на координатные оси;

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Составляя уравнение моментов относительно координатных осей, Коши доказал закон парности касательных напряжений [105]:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (i \neq j) \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (1.2)$$

Из уравнений равновесия элементарного тетраэдра им были получены формулы для компонент напряжения X_{in} [105]:

$$X_{in} = \sigma_{ij} l_j \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1.3)$$

где l_j – косинусы углов, образуемых внешней нормалью к плоскости с осями координат.

Рассматривая деформацию частицы тела, Коши выводит геометрические соотношения, дающие шесть основных зависимостей составляющих линейных и угловых деформаций от составляющих перемещений [105]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (1.4)$$

Наконец, Коши формулирует обобщение закона Гука для сложного напряженного состояния изотропного тела в виде [105]:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + k\delta_{ij}\theta, \quad (1.5)$$

где G, k – упругие постоянные Коши; θ – относительное изменение объема.

Таким образом, Коши создал полную систему уравнений теории упругости изотропного тела, названную впоследствии в его честь. Им же введено наглядное представление напряженного состояния частицы тела – поверхность напряжения Коши и показано, что поперечные сечения при кручении не остаются плоскими. Сен-Венан использовал его выводы при разработке своей теории кручения призматических стержней [112].

Первой книгой по теории упругости можно считать известную работу Габриэля Ляме (1795–1870) «Лекции по математической теории упругости твердых тел» [153], основанную на мемуарах о проблеме устойчивости арок, написанных им совместно с Клапейроном (1799–1864) во время строительства Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге [111].

Значительный вклад в развитие математической теории упругости внес Сен-Венан (1797–1886) [191]. В 1853 году он представил во Французскую академию наук свою знаменитую работу «Мемуары о кручении призм: с соображениями об их изгибе, а также о внутреннем равновесии упругих твердых тел в целом и практическими формулами для расчета их сопротивления различным воздействиям, прилагаемым одновременно» [176], где изложена его теория кручения.

В 1855 году Сен-Венан сформулировал фундаментальный принцип теории упругости, названный в его честь, согласно которому уравновешенная система сил, приложенная к некоторой части твёрдого тела, вызывает в нём появление неравномерности распределения напряжений, быстро уменьшающейся по мере удаления от этой части. На расстояниях, больших максимального линейного размера зоны приложения нагрузок, неравномерность распределения напряжения и деформации оказываются пренебрежительно малыми [112].

Сен-Венан опубликовал много статей в области теории упругости, однако не систематизировал свои многочисленные исследования в виде книг. Но в то же время он издал лекции Навье [169] «Краткое изложение уроков, прочитанных в школе мостов и дамб, по применению механики в строительстве и машиностроении» [177] (1864), а также перевел и опубликовал «Теорию упругости твердых тел» [134] А. Клебша (1883), существенно дополнив первоначальные тексты своими ценными замечаниями и статьями.

У Сен-Венана было много выдающихся учеников: Жозеф Буссинеск (1842–1929), Морис Леви (1838–1910) [155], Эмиль Леонард Матье (1835–1890), Жан Резаль (1854–1919), Альфред Фламант (1839–1915) [6] и др. Жозеф Валентин Буссинеск [149] совершил много открытий в различных областях науки, в том числе в теории упругости, которые он объединил в своей знаменитой книге «Применение потенциалов для изучения равновесия и движения упругих твердых тел» [132]. Его методы определения напряжений и деформаций в полубесконечной среде от действия сосредоточенных сил и равномерно распределенных нагрузок, приложенных к граничной плоскости, до сих пор не утратили практической ценности.

Во второй половине XIX века развитием теории упругости занимались Франц Нейманн (1798–1895) и его ученики Альфред Клебш (1833–1872), Густав Роберт Кирхгофф (1824–1877), Вольдемар Фойхт (1850–1919), изучая

температурные напряжения, распространение волн в упругой среде, колебания, интерференционные узоры и закладывая основы оптического метода исследования напряжений. Некоторые из собственных исследований Нейманна по теории упругости были включены его учеником Оскаром Майером в книгу «Лекции по теории упругости твердых тел и светового эфира, читаемые в Кенигсбергском университете» [112, 170].

Теория упругости позволяет решать огромное число задач, начиная от чистого изгиба призматического стержня и заканчивая расчетом оболочек произвольной формы. Однако распространение таких процессов, как штамповка, прокатка, ковка, прессование, волочение, навивка пружин и других, подтолкнуло инженеров и ученых к поиску закона связи между напряжениями и деформациями за пределом упругости, что стимулировало формирование теории пластичности.

У истоков этого научного направления стоял французский ученый и инженер Анри Эдуард Треска́ (1814–1885) [178]. Известные в середине XIX века подходы в области сопротивления материалов и теории упругости доказали свою высокую эффективность применительно к инженерно-строительным вопросам, но не могли быть использованы при решении задач, связанных со штамповкой и обработкой металлов.

С 1864 по 1870 год Треска провел серию экспериментов по выдавливанию и истечению различных металлов через отверстия под большим давлением [188]. Основная часть экспериментов посвящена свинцу, но для большей общности и возможности сравнения изучались также цинк, медь, железо, некоторые сплавы и даже пески. Поскольку процессы более «низкого» уровня не были изучены в полной мере, теоретические результаты строились на основе феноменологического подхода. Треска предложил механическую теорию, описывающую явление текучести как «поток» из наиболее сжатых точек, движущихся в направлении, встречающем наименьшее количество препятствий. Было также установлено, что «поток»

материи подчиняется ряду геометрических условий, среди которых постоянство общего объема материала [178].

Состояние текучести наступает при достижении касательными напряжениями некоторого предельного постоянного значения k , т. е.

$$\max|\tau_i| \leq k \quad (i = 1, 2, 3). \quad (1.6)$$

Эту гипотезу называют условием пластичности Треска. В своих опытах он экспериментально установил коэффициент k для различных материалов.

Опыты Треска произвели сильное впечатление на Сен-Венана и привлекли его внимание к проблеме пластического течения. Первоначально Треска и Сен-Венан [186] пытались получить решение с помощью чистой кинематики, но быстро пришли к тому, что проблема является также механической и в уравнения необходимо включать напряжения. Материал в пластическом состоянии рассматривался ими как несжимаемый, а упругие деформации считались пренебрежимо малыми по сравнению с пластическими. На основе гипотезы Треска Сен-Венан разработал математическую теорию пластичности для «одноплоскостной» деформации жесткопластического тела, записав закон пластического течения в виде [55]:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 - 4\sigma_{12}^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 - \sigma_{12}^2} = k. \quad (1.7)$$

В настоящее время это уравнение известно как условие пластичности Треска – Сен-Венана.

В 1904 году Максимилиан Титус Губер публикует ряд работ о теории контакта твердых упругих тел [148] и удельной работе напряжений как мере материальных усилий [147]. В последней из них предложена гипотеза, согласно которой критерием перехода материала в критическое состояние может служить удельная потенциальная энергия изменения формы деформированного тела. Труд Губера, написанный на польском языке, не получил широкого распространения, поэтому в 1913 году ту же идею высказал независимо Рихард фон Мизес. В своей работе [161], опираясь на трактат по

технической механике О. Мора [162] и новые на тот момент данные экспериментов фон Кармана [160], Мизес отметил, что вершины шестиугольника кривой текучести Треска – Сен-Венана получены исходя из предположения, что среднее главное напряжение σ_2 вообще не задействовано, что не очень правдоподобно, и предложил записать условие пластичности в виде:

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2}. \quad (1.8)$$

В 1921 году Людвиг Прандтль заметил, что в ряде случаев упругая и пластическая деформации имеют значения одного порядка. Например, при вдавливании штампа в полупространство возникает явление, при котором пластическая деформация оказывается ограничена окружающей упругой зоной. В связи с этим он предложил использовать вместо жесткопластической модели модель идеально упругопластического материала [55].

В 1924 году Генрих Генки, следуя предложению Прандтля, разработал свою деформационную теорию пластического течения [133]. Он также предложил геометрическую интерпретацию поверхности текучести в виде цилиндра в пространстве главных нормальных напряжений, подтвердив тем самым выводы Губера и Мизеса. На основании анализа доступных ему экспериментальных данных Генки сделал вывод о том, что энергия, затрачиваемая на изменение объема (гидростатическое давление или растяжение), не оказывает влияния на достижение материалом пластичности, и предположил, что текучесть наступает при достижении удельной энергией формоизменения предельного значения.

В 1927–1930 годы Андраш (Эндре) Ройсс опубликовал несколько важных работ по теории пластичности, [128, 179], в которых он, вероятно независимо от Прандтля, обобщил уравнения Леви – Мизеса, распространив их на пространственный случай, и одновременно с Мизесом показал, что энергия упругого формоизменения складывается из изменения объема и

формоизменения. Он понял, что при обработке металлов упругое изменение формы чаще всего не является незначительным и пренебрегать им нельзя. Список работ Ройсса можно найти в статье [130].

Первыми обстоятельными экспериментальными исследованиями законов пластичности при сложном напряжённом состоянии, подтверждающими явное преимущество условия пластичности Мизеса перед условием постоянства касательных напряжений, считаются опыты Надаи – Лоде [68, 163].

Следующим важным шагом в теории пластичности стал учет упрочнения материалов в процессе пластической деформации. В 1928 году Рош и Эйхингер описали этот процесс и предложили закон для его описания [174]. Кроме того, они, основываясь на гипотезе квазиизотропии пластически упрочняющихся начально изотропных материалов, выдвинули закон «единой кривой» при пропорциональном нагружении [110].

Современную теорию пластичности невозможно представить без имени Алексея Антоновича Ильющина [13]. Им были введены основополагающие понятия простого и сложного нагружений, процессов нагружения и деформирования, сформулированы физические законы для упрочняющихся сред при пропорциональном нагружении, теорема о простом нагружении и др. [68, 70, 71].

А.А. Ильющин проанализировал существующие частные теории пластичности и показал, что для случая, когда нагрузки возрастают пропорционально некоторому параметру (простое нагружение), все они сводятся к его общей теории малых упругопластических деформаций. В начале Великой Отечественной войны эта теория позволила существенно удешевить и упростить процессы проектирования, производства и приемки снарядов, благодаря чему удалось решить острейшую проблему «снарядного голода» [71].

В послевоенный период теорию пластичности продолжили развивать В.В. Соколовский (1912–1978) [107], Ю.Н. Работнов (1914–1985) [99, 100, 101], В.В. Москвитин (1923–1983) [92], В.В. Новожилов (1910–1987) [95], М.Я. Леонов (1912–1992) [86], Л.М. Качанов (1914–1993) [79], Г.И. Быковцев (1938–1994) [15], А.А. Ильюшин (1911–1998) [69], Э.С. Макаров, Л.А. Толоконников (1923–1998) [89], В.С. Ленский (1913–1998) [83], С.А. Христианович (1908–2000) [119], В.З. Партон (1937–2000) [96], В.Д. Ключников (1928–2001) [80], А.Ю. Ишлинский (1913–2003) [72, 73], Е.И. Шемякин (1929–2009), Д.Д. Ивлев (1930–2013) [63, 64, 65], Ю.Н. Шевченко (1926–2016) [125], Ю.И. Кадашев (1929–2018) [75, 77], Р.А. Васин (1937–2019) [17], В.Г. Зубчанинов (1930–2025) [42], Б.Д. Аннин (1936) [3, 4], В.С. Бондарь (1944) [11], А.И. Хромов (1949) [120], Ю.Н. Радаев (1962) [102] и другие исследователи [28, 62, 76].

Среди иностранных ученых, внесших значительный вклад в развитие теории пластичности, можно выделить В. Прагера [173], Б. Поля [97], А. Надаи [164, 165], Р. Хилла [143], Дж. Райса [103], Ф.Э. Макклинтока [187], Э.А. Дэвиса [137, 138], Ж.-Л. Шабоса [8] и др. [27].

1.2. Современные теории пластичности

Интерес ученых к проблеме пластичности привел к возникновению и развитию двух принципиально разных направлений построения определяющих соотношений: основанных на формальном математическом описании континуальных объектов (теория пластического течения, теория упругопластических процессов и т. д.) и рассматривающих скрытые физические процессы (теория скольжения, многоуровневые модели и др.).

Современная теория пластического течения основана на разложении тензора полной деформации в виде суммы тензоров упругой и пластической деформаций, а также на использовании предельной поверхности деформирования и нагружения. Поверхность текучести представляет собой,

как правило, выпуклую пятимерную поверхность в шестимерном пространстве напряжений. Внутри материал считается упругим, а при достижении предела текучести – пластичным. Для удобства визуализации используют трехмерное пространство главных напряжений $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. Трехмерные условия прочности характеризуют при помощи их девиаторных сечений, т. е. плоскостей, проходящих перпендикулярно гидростатической оси и рассекающих предельную поверхность.

Одним из первых и наиболее известных является условие прочности Треска – Сен-Венана. Рассечение девиаторной плоскостью предельной поверхности Треска – Сен-Венана дает правильный шестиугольник. Более совершенна модель Мизеса – Губера, в которой девиаторная плоскость представляет собой эллипс.

Для материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии (например, грунтов или бетона), поверхности текучести представляются в виде неправильных шестигранных пирамид в соответствии с условием Кулона – Мора или правильных конусов критерий текучести Друкера – Прагера.

Кроме того, различные теории пластического течения отличаются друг от друга формой задания функции нагружения [43]. Примерами частных теорий пластического течения являются, например, теория течения с трансляционно-изотропным упрочнением Новожилова – Кадешевича [77], обобщённая теория течения В.С. Бондаря [11] с учётом эффекта Баушингера и принципа Мазинга, неизотермическая модель Темиса [109], модифицированная теория течения В.Г. Зубчанинова [46] и др.

В 1971 году К.С. Валанисом была предложена эндохронная теория пластичности [189], сконструированная без использования понятия поверхности текучести. Пластические деформации в данной теории определяются через скалярную неубывающую переменную величину, называемую «внутренним временем» [78]. С 80-х годов XX века развитием

данного направления занимались Ю.И. Кадашевич, А.Н. Михайлов, С.П. Помыткин и др. [74, 98].

Новым направлением стала теория упругопластических процессов, которая с самого момента создания стала объектом многочисленных споров и дискуссий [66]. Принципиальное отличие теории процессов от теории пластического течения состоит в отказе от концепции разложения деформаций на упругую и пластическую части и замене предельных поверхностей эквивалентными законами деформирования или нагружения $\varepsilon \sim \sigma$ (единая кривая Роша – Эйхингера) [43]. Считается, что в случае сложного нагружения и деформирования правомерность разложения тензора полной деформации в виде суммы тензоров упругой и пластической деформаций является сомнительной, поскольку четкой границы между двумя состояниями частицы не существует. Как исключение оно возможно лишь при простом нагружении или сложном нагружении с изломом траектории на 180° (простая разгрузка).

Основные подходы и постулаты общей математической теории упругопластических процессов впервые были сформулированы А.А. Ильюшиным [69]. Ему удалось представить процесс нагружения и деформирования геометрически, при этом в качестве временного параметра используется длина дуги траектории деформирования. Свойства материалов подразделяются на скалярные, характеризующие изменение модуля вектора напряжений, и векторные, отвечающие за его направление. Связь между напряжениями и деформациями для начально изотропных тел в общей форме выражает общий постулат изотропии, согласно которому возникающий в процессе деформирования тензор напряжений (σ_{ij}) есть вполне определенный функционал, зависящий от тензора деформаций (ε_{ij}) , температурного поля T , давления p , дозы радиоактивного облучения Q , интенсивности электромагнитного поля I и других физических параметров β [43]:

$$\sigma_{ij} = F_{ij}\{\varepsilon_{ij}, T, p, Q, I, \beta\} \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (1.9)$$

Введение новых характеристик материалов (таких как след запаздывания, кривизна траектории и др.) позволило А.А. Ильюшину произвести классификацию процессов деформирования. С этого момента стало возможным разрабатывать определяющие соотношения для классов траекторий (малой кривизны, средней кривизны, большой кривизны, с изломами траекторий и т. д.), ограничивая тем самым область применимости существующих частных теорий.

Разработка теории упругопластических процессов позволила реализовать предложенный А.А. Ильюшиным метод СН-ЭВМ, который дает возможность в опытах на сложное нагружение определять параметры нагружения, при которых конструкция теряет устойчивость или исчерпывает несущую способность. Данный метод ставит в соответствие явления, происходящие в трубчатом образце, с явлениями, происходящими в окрестности интересующей точки реального тела (конструкции). Таким образом, метод СН-ЭВМ стал альтернативой классическим методам натурных испытаний и масштабного моделирования. При этом для решения разнообразных задач стало возможным использовать универсальное автоматизированное оборудование и стандартные цилиндрические оболочки [5, 10].

Помимо теории течения и процессов, основанных на гипотезах формально-континуального характера, существуют также теории, учитывающие реальное строение и картину деформирования материалов на мезо- и микроуровнях, получившие название физических. Возникновение и развитие физических теорий пластичности происходит параллельно с изобретением электронного микроскопа, использующего пучок электронов для получения увеличенных изображений, и открытием дефектов кристаллической решетки твердых тел, таких как дислокации, в 30-х годах XX века. основополагающими работами можно по праву считать труды Дж.И. Тейлора, К.Ф. Элама [181, 182, 184] и Г.О. Закса [159], свои модели

разрабатывали также Дж.Ф. Бишоп, Р.А. Хилл [131], Т.Г. Линь [87]. Сегодня физические теории пластичности развивают в своих работах П.В. Трусов [113], [116], А.И. Швейкин [117], П.С. Волегов [118], Н.С. Кондратьев [151], А.Ю. Янц [114] и др.

Отдельной ветвью теорий, описывающих сложное напряженное состояние и отражающих процессы, протекающие в отдельных кристаллических зернах, стала теория скольжения Батдорфа – Будянского [7]. В её основу было положено предположение о наличии в каждом отдельном зерне совокупности систем скольжения, характеризующихся плоскостями и направлениями скольжения. Пластический сдвиг происходит при достижении касательным напряжением предела текучести, дальнейшая деформация представляется некоторой функцией касательного напряжения [7].

Другие варианты теории скольжения развиты в трудах А.К. Малмейстера [90], В.Т. Койтера [81], Н.Ю. Швайко [124], И.С. Никитина [93]. Так, например, в работе [94] рассматривается вариант теории скольжения, применяемый при построении упругопластических моделей деформируемого твердого тела. Основные отличия различных теорий сводятся к выбору систем скольжения и законов, описывающих пластическое скольжение в конкретных условиях. К недостаткам данной теории на текущий момент можно отнести сложность получаемых уравнений и зависимостей, а также трудности, возникающие при решении конкретных практических задач.

Подводя итог анализу современных теорий пластичности, можно сделать вывод о том, что каждая из них вносит свой важный вклад в понимание механизмов деформации материалов на микро-, мезо- и макроуровне, однако все они нуждаются в проведении экспериментальных исследований.

1.3. Экспериментальные исследования по установлению закономерностей упругопластического деформирования материалов, актуальные вопросы и перспективы

Как было отмечено выше, начало XX века характеризуется переходом от использования элементарного аппарата сопротивления материалов и эмпирических формул в расчетах к полному анализу напряженно-деформированного состояния с использованием более сложных теорий. Число теоретических работ в области изучения пластичности материалов росло, и дальнейшее развитие требовало проведения большого числа различных экспериментальных исследований.

Одними из первых фундаментальных работ в области экспериментальной механики, посвящённых исследованию общих закономерностей упругопластического деформирования материалов, были эксперименты В. Лоде, поставленные с целью проверки основных физических законов и постулатов теории пластичности при сложных процессах [156]. С 1926 по 1928 год он провел и тщательно задокументировал опыты по осевому растяжению с равномерным внутренним гидростатическим давлением тонкостенных трубчатых образцов из различных материалов. Похожие эксперименты проводились М. Рошем и А. Эйхингером [175]. Тейлор и Куинни наблюдали за поведением тонкостенных алюминиевых, медных и стальных трубок в разнообразных условиях двумерного напряженного состояния, комбинируя растяжение с кручением [183].

Первые фундаментальные опыты в области экспериментальной механики по исследованию общих закономерностей упругопластического деформирования материалов, поставленные с целью проверки основных физических законов и постулатов теории пластичности при сложных процессах нагружения, были проведены на многозвенных (в основном двухзвенных) траекториях с углами излома $\vartheta_1 = 90$ в плоскостях $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (при растяжении и кручении) либо $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ (растяжение и внутреннее или внешнее

давление) девиаторного пространства деформаций. К таким фундаментальным работам можно отнести исследования, выполненные А.М. Жуковым, В.П. Дегтяревым [26], В.С. Ленским [84, 85], Л.С. Андреевым, И.М. Коровиным [82], И.Д. Машковым, А.А. Лебедевым, Р.А. Васиным [67]. Трубчатые образцы из алюминиевого сплава, латуни и меди испытывались В.А. Свешниковой на растяжение с последующим кручением и наоборот [106].

Несколько позже, к середине прошлого века, А. М. Жуков провёл серию экспериментов и выполнил масштабный анализ эмпирических данных с целью проверки ключевых постулатов теории пластичности. В своих работах он анализировал поведение различных материалов при упругопластическом деформировании [32], изучал пластические свойства при сложном деформировании [29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]. Жуков считал, что для надежного расчета на прочность необходимо учитывать анизотропию металла и остаточные напряжения.

За рубежом экспериментами в области пластичности занимались П.М. Нагди [166], Хилл [144], Марин и Уайзман [157, 158], Ван Хорн [190], Р.В. Питерс, Н.Ф. Доу и С.Б. Батдорф [172], Дж. Марин, А. Зауер, Л.В. Ху [146, 158], Д.К. Друкер [139], Охаши и Токуда [171] и др.

Исследование пластичности кристаллических твердых тел является огромной, постоянно развивающейся областью научного знания [154]. При этом развитие технического прогресса дает исследователям все больше инструментов для изучения механизмов пластического течения.

Современные исследования процессов, происходящих на микро- и мезоуровне, основаны на применении таких технологий, как Electron Back-Scatter Diffraction (EBSD). Дифракция обратного рассеивания электронов – метод анализа, основанный на применении сканирующих электронных микроскопов для получения цветных контрастных изображений кристаллов в субмикронном разрешении [135].

Для определения полей деформаций применяют метод цифровой корреляции изображений Digital Image Correlation (DIC), [129, 150], когда на объект исследования наносят черные или белые точки и с помощью камер анализируют их перемещение в процессе деформирования. При этом для получения более точных результатов предварительно наносят слой матовой краски белого или черного цвета соответственно. Данный способ позволяет бесконтактно измерять деформации тел практически любых форм и материалов. Кроме того, активно применяется метод конечных элементов (МКЭ) (Finite Element Analysis, FEA) [9].

Продолжается работа по совершенствованию методов испытаний для определения констант материалов модуля упругости, предела текучести, предела прочности и пр. Так, в работе [127] приводится методика определения характеристик пластичных медицинских сплавов при испытаниях на сжатие. В работе [91] предложена методика преобразования кинетических диаграмм вдавливания сферического индентора в диаграммы растяжения для конструкционных сталей (в том числе сталь 45) и сплавов.

А.В. Корнева, Г.Ф. Корзникова, Р.М. Кашаев, Б.Б. Страумал для некоторых сплавов исследовали интенсивную пластическую деформацию при растяжении с кручением в условиях высоких температур от 750 до 850 °С [152].

Представители Тверской научной школы, ученики профессора В.Г. Зубчанинова В.И. Гультяев, С.Л. Субботин, А.А. Алексеев, Е.Г. Алексеева, А.С. Двужиллов, И.А. Саврасов, С.В. Черемных, П.О. Скудалов, В.В. Гараников, Н.Л. Охлопков и др., систематически проводят экспериментальные исследования на сложное докритическое нагружение с использованием автоматизированного испытательного оборудования.

К настоящему времени накоплено большое количество материалов по различным видам траекторий: двухзвенным и многозвенным, плоским и

пространственным, ломанным и криволинейным, открытым и замкнутым [1, 2, 45, 50, 53]. Экспериментальные исследования, выполненные на комплексе СН, проводились на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках, изготовленных из различных материалов, таких как сталь 3, сталь 45, сталь 45-М, 40Х16Н9Г2С-М, 9Х2, латунь Л63, алюминиевые сплавы Д16, В95 и др. [54, 57, 59].

1.4. Запаздывание векторных и скалярных свойств материалов

При исследовании сложного нагружения исследователи столкнулись с эффектами запаздывания (памяти) векторных и скалярных свойств материалов. С начала 50-х и вплоть до 80-х годов прошлого века проводились экспериментальные исследования, посвященные проверке сформулированного А.А. Ильюшиным принципа запаздывания: «Величина следа запаздывания... является основным линейным масштабом процесса сложного нагружения» [16]. Позднее в трудах А.А. Ильюшина, В.С. Ленского, В.Г. Зубчанинова, П.А. Моссаковского и др., трактовка принципа неоднократно корректировалась с целью уточнения и практического использования.

Р.А. Васин в работе [18] формулирует ряд важных замечаний и дополнений, в частности, говорит о необходимости внесения в нормативные документы характеристики следа запаздывания для каждого материала, экспериментального выявления характерных особенностей векторных и скалярных свойств, которые можно было бы эффективно использовать при аттестации определяющих соотношений, разработки эффективных подходов и алгоритмов классификации реальных термомеханических процессов с опорой на идеологию теории упругопластических процессов.

В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гараников исследовали закономерности изменения скалярных и векторных свойств материалов и поведение функций процесса для плоских и пространственных траектории, а

также определяли длины следов запаздывания для некоторых траекторий [56]. В данной работе сделаны выводы о влиянии изменения направления процесса на характер поведения углов сближения и расхождения и о возможности по векторным и скалярным свойствам оценить, насколько процесс близок к простому, квазипростому и т. д.

В.Г. Зубчанинов и Е.Г. Алексеева в статье [51] рассматривают свойство запаздывания векторных свойств, изменение функций процесса сложного нагружения и предлагают классификацию траекторий деформирования по отношению к сложности нагружения для верификации теорий пластичности, которые не учитывают векторные свойства материала в явном виде.

В.В. Гараников на основе экспериментальных исследований закономерностей изменения векторных свойств на пространственных криволинейных траекториях постоянной кривизны и кручения приходит к заключению о том, что след запаздывания векторных свойств материала возрастает с увеличением кривизны и крутки траектории [21]. Он также отмечает, что «по исчерпанию некоторого интервала длины траектории скалярные и векторные свойства «забывают» смену направления деформирования и соответствуют траекториям без смены направления деформирования» [20].

Теоретические эксперименты В.С. Бондаря и В.В. Даншина показали, что «след запаздывания векторных свойств не является универсальной характеристикой материала, а существенно зависит от угла излома и длины траектории первого звена. Для более детального подтверждения приведенных выше утверждений необходимы первичные экспериментальные данные при более широком спектре углов излома, длин первого звена и различных материалов» [12].

П.В. Трусов и А.И. Швейкин [115] связали физические причины запаздывания векторных свойств со скоростями релаксации искажений решетки, накопленных на предыдущих этапах деформирования, т. е. упругих

деформаций: «После достижения критических напряжений резкое изменение направления деформирования для значительного числа кристаллитов, входящих в представительный объем макроуровня, приводит к уменьшению величины касательных напряжений, соответствующих началу скольжения по новым системам скольжения, и к "нырку" напряжений на диаграмме "интенсивность напряжений – интенсивность накопленных пластических деформаций". В дальнейшем происходит упрочнение по активным системам скольжения, в результате чего величина вектора напряжения также начинает расти».

С.А. Соколов и С.В. Черемных проводили моделирование процесса пластического деформирования тонкостенной цилиндрической оболочки из стали 9Х2 по двухзвенной траектории, где первый прямолинейный участок соответствует приложению осевой сжимающей силы, а на втором участке, происходит замкнутый виток траектории постоянного радиуса при воздействии на цилиндрическую оболочку силами сжатия и кручения [121, 122].

А. Surmiri, А. Nayebi и Н. Rokhgireh прогнозировали деформации при различных траекториях нагружения, используя сочетание нелинейной модели кинематического упрочнения Шабоса и модели анизотропной механики повреждений сплошных сред Леметра [180].

В. Hamza, М. Mokhtari, А. Slamene, R. Medjahed, Н. Benzaama и Н. Dadoun в [141, 142] разрабатывают и верифицируют численные модели для прогнозирования поведения сталей (Q345, Q460 и др.) при монотонном и циклическом нагружении по различным протоколам, сравнивая результаты расчётов с экспериментальными данными при одноосном и двухосном нагружении.

Yilin Zhu, Guozheng Kang, Qianhua Kan, Otto T. Bruhns, Yujie Liu в работе [192] разработали концепцию и создали термомеханически связанную упруговязкопластическую модель с учетом внутреннего тепловыделения для

описания деформации нержавеющей стали 316L, теоретические результаты сравнивались с опытом на растяжение с кручением.

Обзор научной литературы показывает, что экспериментальные исследования при сложном нагружении практически отсутствуют. Одними из основных препятствий являются сложность и дороговизна проведения опытов на сложное нагружение. Важны также вопросы учета масштабного фактора, ограничения длины дуги траектории деформирования или нагружения, связанные с потерей устойчивости образцов, большое количество применяемых материалов и др.

Потенциальные преимущества исследования сложного нагружения заключаются в возможности более точного моделирования, совершенствования качества, повышения надежности, оптимизации ресурсов и сокращения времени выхода на рынок. Полученные результаты закладываются в расчетные комплексы (ANSYS, ABAQUS и др.), а модели калибруются по базовым опытам.

В мостовом строительстве современные нормативные документы требуют проверять мосты на устойчивость к прогрессирующему обрушению (например, при обрыве ванта или разрушении опоры судном, транспортом или другим воздействием), когда элементы моста за доли секунды по сложным траекториям переходят из упругого состояния в пластическое. Аналогичные эффекты могут возникать при землетрясении.

Ортотропные плиты проезжей части, конструкции пилонов, трубчатые элементы арочных, вантовых и подвесных мостов в процессе строительства и эксплуатации также испытывают сложное нагружение. Например, сначала конструкция при изготовлении подвергается технологическому растяжению/сжатию (первое звено траектории), а затем, при монтаже или во время эксплуатации, возникают сдвиговые/крутящие нагрузки за счет эксцентриситета приложения временной подвижной нагрузки или кривизны моста (второе звено).

Медицинские, фармацевтические, а также другие биомедицинские продукты и изделия часто испытывают растяжение/сжатие совместно с кручением. Например, искусственные импланты при протезировании суставов [167], костные винты, медицинские трубки при подключении, колпачки, которые должны сохранять целостность при хранении и транспортировке, но легко открываться медицинским работником или пациентом, медицинские иглы и многое другое.

Таким образом, появляется целый ряд задач, связанных с необходимостью проведения дополнительных экспериментальных исследований по изучению следов запаздывания скалярных и векторных свойств материалов при сложном пластическом деформировании.

Из вышеизложенного следует, что развитие теории пластичности является актуальной задачей механики деформируемого твердого тела, а для проверки новых положений современных теорий необходимо проведение различных экспериментов, особенно на сложное нагружение.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

2.1. Образы процессов нагружения и деформирования

В современной теории процессов упругопластического деформирования под процессом понимается изменение однородного напряженно-деформированного состояния в малой окрестности выбранной точки с течением времени при заданных значениях температуры, давления, дозы радиоактивного облучения, интенсивности электромагнитного поля и других физических параметров [43].

Процесс нагружения или деформирования считается заданным, если заданы компоненты тензоров напряжений σ_{ij} или деформаций ε_{ij} как непрерывные функции некоторого множества параметров как механической, так и физической природы:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(x_k, t, \rho, p, T, \dots), \\ \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}(x_k, t, \rho, p, T, \dots),\end{aligned}\tag{2.1}$$

где t – время; ρ – плотность; p – давление; T – температура.

Привычным является геометрическое представление деформаций в виде некоторой чистой деформации и подходящего поворота [88]. Если принять, что объемная деформация упруга, а зависимость между модулями шаровых тензоров напряжений σ_0 и деформаций ε_0 линейна (2.4), что справедливо для большинства материалов [43, 44], то можно перейти от рассмотрения компонент тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} к рассмотрению компонент их тензоров-девиаторов, произведя разложение:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + S_{ij} \rightarrow S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij},\tag{2.2}$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \delta_{ij} + \mathcal{E}_{ij} \rightarrow \mathcal{E}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_0 \delta_{ij},\tag{2.3}$$

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0,\tag{2.4}$$

где S_{ij} – тензор-девиатор напряжений, характеризующий состояние нормального и касательного формоизменения;

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ при } i = j \\ 0, \text{ при } i \neq j \end{cases} - \text{символ Кронекера};$$

$\sigma_0 = \sigma_{ii}/3 = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$ – среднее напряжение, или модуль шаровой составляющей тензора напряжений, соответствует всестороннему растяжению/сжатию;

$\varepsilon_0 = \varepsilon_{ii}/3 = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})/3$ – среднее относительное удлинение, или модуль шарового тензора деформаций;

K – объемный модуль.

Если ввести понятия направляющего тензора напряжения (S_{ij}^*) и деформаций $(\mathcal{E}_{ij}^*)$, компоненты которых определяются по формулам [43]:

$$S_{ij}^* = S_{ij}/\sigma \rightarrow S_{ij} = \sigma S_{ij}^*, \quad (2.5)$$

$$\mathcal{E}_{ij}^* = \mathcal{E}_{ij}/\mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}_{ij} = \mathcal{E} \mathcal{E}_{ij}^*, \quad (2.6)$$

где $\sigma = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$ – модуль девиатора напряжений;

$\mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_{ij}\mathcal{E}_{ij}}$ – модуль девиатора деформаций,

то для определения компонент тензоров напряжений и деформаций имеем равенства:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + \sigma S_{ij}^*, \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \delta_{ij} + \mathcal{E} \mathcal{E}_{ij}^*. \quad (2.8)$$

Таким образом, показано, что в процессе нагружения или деформирования тензоры напряжений и деформаций обладают как векторными, так и скалярными свойствами. Шаровые модули σ_0 , ε_0 и модули девиаторов σ , $\mathcal{E}$ характеризуют скалярные свойства, а направляющие тензоры S_{ij}^* , $\mathcal{E}_{ij}^*$ определяют векторные свойства материала. Если во время деформирования все компоненты $\mathcal{E}_{ij}^* = \text{const}$, деформация считается простой, в противном случае сложной, для нагружения аналогично.

С учетом вышеизложенного физический процесс нагружения или деформирования может быть задан в векторном девиаторном пространстве. Рассмотрим два пятимерных евклидовых пространства Σ_5 и E_5 с общим

единичным ортогональным декартовым репером $\hat{e}_k$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) в начале координат, в котором зададим вектор напряжений $\bar{\sigma}$, тождественный тензору-девиатору S_{ij} , и вектор деформаций $\bar{\Xi}$, тождественный тензору-девиатору Ξ_{ij} :

$$\begin{aligned}\bar{\sigma} &= S_k \hat{e}_k, \\ \bar{\Xi} &= \Xi_k \hat{e}_k,\end{aligned}\tag{2.9}$$

где S_k, Ξ_k – координаты векторов напряжений $\bar{\sigma}$ и деформаций $\bar{\Xi}$.

$$\begin{aligned}S_{ij}S_{ij} &= \sigma^2 \equiv S_k S_k, & \hat{e}_i \hat{e}_j &= \delta_{ij}. \\ \Xi_{ij}\Xi_{ij} &= \Xi^2 \equiv \Xi_k \Xi_k,\end{aligned}\tag{2.10}$$

Учитывая, что $S_{ii} = 0$ и $\Xi_{ii} = 0$, имеем по пять независимых функций $S_k(t)$ и $\Xi_k(t)$, однако из (2.10) величины S_k и Ξ_k определяются неоднозначно. Один из возможных вариантов решения [44]:

$$\begin{cases} S_1 = \sqrt{3/2} S_{11}, & S_2 = \sqrt{2}(S_{22} + S_{11}/2), \\ S_3 = \sqrt{2} S_{12}, & S_4 = \sqrt{2} S_{23}, \quad S_5 = \sqrt{2} S_{13}, \end{cases}\tag{2.11}$$

$$\begin{cases} \Xi_1 = \sqrt{3/2} \Xi_{11}, & \Xi_2 = \sqrt{2}(\Xi_{22} + \Xi_{11}/2), \\ \Xi_3 = \sqrt{2} \Xi_{12}, & \Xi_4 = \sqrt{2} \Xi_{23}, \quad \Xi_5 = \sqrt{2} \Xi_{13}. \end{cases}\tag{2.12}$$

В процессе нагружения конец вектора $\bar{\sigma}$ напряжений описывает в пространстве напряжений Σ_5 кривую – траекторию нагружения. Длина дуги траектории нагружения обозначается Σ . Аналогично конец вектора $\bar{\Xi}$ деформаций описывает в пространстве деформаций E_5 траекторию деформации длиной s . На рисунке 2.1 представлен образ процесса нагружения в пространстве напряжений Σ_3 (а) и пространстве деформаций E_3 (б) в трехмерном евклидовом пространстве.

За время dt векторы $\bar{\sigma}$ и $\bar{\Xi}$ получают приращение:

$$\begin{aligned}d\bar{\sigma} &= dS_k \hat{e}_k, \\ d\bar{\Xi} &= d\Xi_k \hat{e}_k,\end{aligned}\tag{2.13}$$

где $d\bar{\sigma}$ – вектор, направленный по касательной к траектории нагружения;

$d\bar{\Xi}$ – вектор, направленный по касательной к траектории деформации.

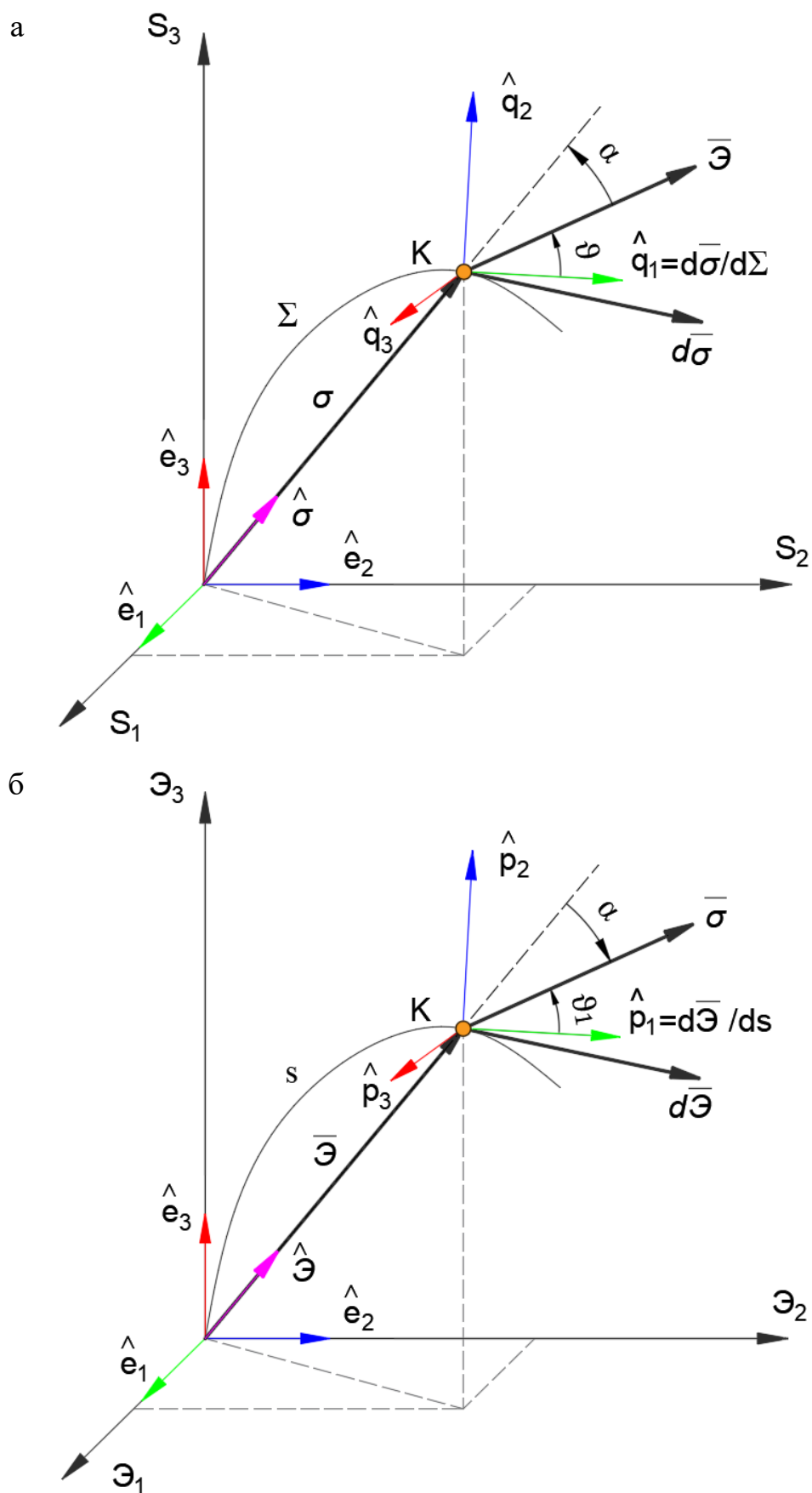


Рисунок 2.1 – Образ процесса нагружения (а) в Σ_3 и (б) в E_3

Модули $|d\bar{\sigma}| = d\Sigma$ и $|d\bar{\Xi}| = ds$ есть дифференциалы дуги траектории нагружения и деформации, причем направление касательной к траектории нагружения характеризуется единичным вектором $\hat{q}_1$, а к траектории деформации – единичным вектором $\hat{p}_1$, при этом [43]:

$$\hat{q}_1 = \frac{d\bar{\sigma}}{d\Sigma}, \quad \hat{p}_1 = \frac{d\bar{\Xi}}{ds}. \quad (2.14)$$

Единичные векторы напряжений $\hat{\sigma}$ и деформации $\hat{\Xi}$ эквиваленты направляющим тензорам S_{ij}^*, Ξ_{ij}^* [43]:

$$\hat{\sigma} = \bar{\sigma}/\sigma, \quad \hat{\Xi} = \bar{\Xi}/\Xi. \quad (2.15)$$

При простом нагружении $\hat{\sigma}$ неподвижен в Σ_5 , траектория нагружения представляет собой прямой луч, а векторы $\bar{\sigma}$, $\bar{\Xi}$, $d\bar{\sigma}$, $d\bar{\Xi}$ направлены вдоль этого луча (рисунок 2.2а). В случае если траектории нагружения и деформирования криволинейны, но векторы $\bar{\sigma}$ и $\bar{\Xi}$ сонаправлены, образ процесса называется квазипростым (рисунок 2.2, б) [44].

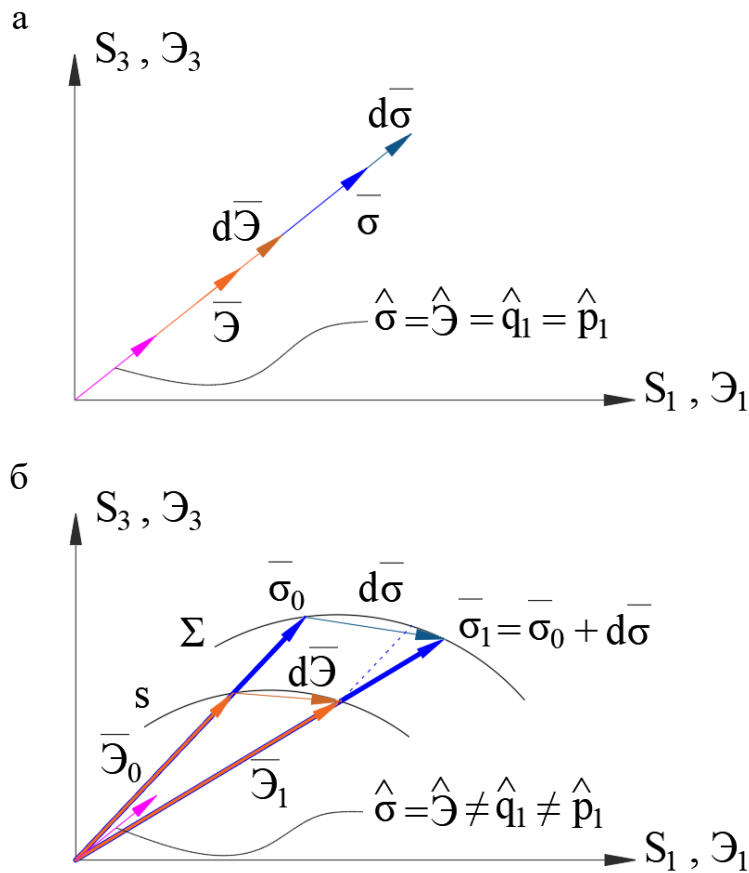


Рисунок 2.2 – Образ простого нагружения (а); квазипростого нагружения (б)

2.2. Критерии состояний процессов деформирования и нагружения

При исследовании процессов сложного упругопластического поведения материалов следует различать активные (нагрузку) и пассивные (разгрузку) процессы деформирования [44]. Рассмотрим критерии активного и пассивного деформирования. При рассмотрении общих (глобальных) процессов нагружения и деформирования будем выделять [43]:

$d\sigma > 0$ – общий процесс нагружения;

$d\sigma < 0$ – общий процесс разгрузки;

$d\varepsilon > 0$ – общий процесс деформационного нагружения;

$d\varepsilon < 0$ – общий процесс деформационного разгрузки.

В случае рассмотрения локальных процессов будем выделять:

$dS_k > 0$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) – локальное нагружение;

$dS_k < 0$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) – локальное разгрузка;

$d\varepsilon_k > 0$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) – локальное деформационное нагружение;

$d\varepsilon_k < 0$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) – локальное деформационное разгрузка.

В качестве критерия состояния процесса деформирования материала выступает знак приращения энергии деформирования [43]:

$$dA = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} = dA_0 + dA_\phi, \quad (2.16)$$

где $dA_0 = \sigma_0 d\theta$ – приращение энергии всестороннего (объемного) расширения-сжатия;

$dA_\phi = S_{ij} d\varepsilon_{ij} = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = \sigma d\sigma \cos\vartheta_1$ – приращение энергии деформирования формоизменения;

$\theta = \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$ – относительное изменение объема;

$\cos\vartheta_1 = \hat{\sigma} \cdot \hat{p}_1$ – косинус угла сближения.

По аналогии для процесса нагружения знак приращения энергии напряжений (дополнительной работы):

$$dB = \varepsilon_{ij} d\sigma_{ij} = dB_0 + dB_\phi, \quad (2.17)$$

где $dB_0 = \mathfrak{Z}_0 d\theta$ – приращение дополнительной энергии всестороннего расширения-сжатия;

$dB_\Phi = \mathfrak{Z}_{ij} dS_{ij} = \bar{\mathfrak{Z}} d\bar{\sigma} = \mathfrak{Z} d\Sigma \cos \vartheta_1^*$ – приращение энергии напряжений формоизменения;

$\cos \vartheta_1^* = \hat{\mathfrak{E}} \cdot \hat{q}_1$ – косинус угла запаздывания.

Учитывая, что для многих материалов энергия всестороннего расширения-сжатия обратима, критерием необратимости процессов деформирования и нагружения можно считать [43]:

$$\begin{aligned} dA_\Phi &> 0 \quad (0 \leq \vartheta_1 < 90^\circ), \\ dB_\Phi &> 0 \quad (0 \leq \vartheta_1^* < 90^\circ). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Критерием пассивных процессов деформирования и нагружения:

$$\begin{aligned} dA_\Phi &< 0 \quad (90^\circ < \vartheta_1 \leq 180^\circ), \\ dB_\Phi &< 0 \quad (90^\circ < \vartheta_1^* \leq 180^\circ). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Пограничное условие в виде (2.20) – нейтральный процесс.

$$\begin{aligned} dA_\Phi &= 0 \quad (\vartheta_1 = 90^\circ), \\ dB_\Phi &= 0 \quad (\vartheta_1^* = 90^\circ). \end{aligned} \quad (2.20)$$

При этом в случае рассмотрения простых (пропорциональных) процессов деформационного (жесткого) и силового (мягкого) нагружений достаточно одного из них в силу их соответствия друг другу. В случае рассмотрения сложных процессов в одних направлениях процессы могут быть активными, в других – пассивными [43].

В действительности эксперименты позволяют надежно определять только полные деформации при различных траекториях нагружения и деформирования, а возникающие состояния полной и неполной пластичности по Хаару и Карману, когда в одних направлениях частицы тела возникают необратимые процессы, а в других упругие, а также состояния полной и неполной упругости при пассивных процессах сложного разгружения невозможно объяснить в рамках существующих теорий [43]. Кроме того,

встает вопрос о правильном определении функционалов пластичности и влиянии на них угла сближения.

2.3. Теория малых упругопластических деформаций, постулат изотропии и принцип запаздывания при простом нагружении

В 1948 году А.А. Ильюшин в своей монографии задался вопросом: «Существуют ли нагрузки, прилагаемые к телу произвольной формы, такие, чтобы от момента их приложения и в течение всего времени их возрастания до заданных окончательных значений направляющий тензор напряжений или направляющий гиперboloид напряжений в любой точке тела оставался постоянным, будучи различным в разных точках тела. Иначе говоря, существует ли для тела сложной формы и нагрузок данного типа (любого) такой способ их возрастания от нуля до заданных значений, чтобы главные оси напряжений, различные в разных точках тела, не изменяли своей ориентации относительно материальных частиц за всё время возрастания нагрузки и чтобы отношение между собой главных касательных напряжений оставалось постоянным (но, вообще говоря, различным для разных точек тела)» [68].

Ответ на этот вопрос был частично дан А.А. Ильюшиным в теореме о простом нагружении, согласно которой если процесс нагружения тела является простым, то результаты теории малых упругопластических деформаций согласуются с опытом. Деформация тела будет простой, если все нагрузки возрастают от момента их приложения пропорционально одному общему параметру, например пропорциональной одной из нагрузок, и, кроме того, совершенной независимо может изменяться постоянное внешнее давление [68]. При этом зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ для многих материалов с достаточной степенью точности аппроксимирует опытные кривые:

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon_i^n, \quad (2.21)$$

где $\sigma_i = \sqrt{3J_{2\sigma}} = \sqrt{3/2} \sigma$, $\varepsilon_i = 2\sqrt{J_{2\varepsilon}}/\sqrt{3} = \sqrt{2/3} \varepsilon$ – интенсивность напряжений и деформаций соответственно;

A и n – некоторые произвольные параметры.

В.Г. Зубчаниновым было предложено нагружение в точке считать простым, если все компоненты тензора напряжений (σ_{ij}) изменяются пропорционально одному параметру t (2.22), в противном случае нагружение считается сложным [43].

$$\sigma_{ij} = t \cdot \sigma_{ij}^0, \quad (2.22)$$

При простом нагружении все частные теории пластичности сводятся к общей теории малых упругопластических процессов А.А. Ильюшина (ТМУПП). В упругом состоянии связь между напряжениями и деформациями определяется обобщённым законом Гука:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left((1 + \mu) \sigma_{ij} - \mu \delta_{ij} \sigma_{kk} \right), \quad (2.23)$$

или, в развернутом виде:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} (\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})),$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} (\sigma_{22} - \mu(\sigma_{33} + \sigma_{11})),$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E} (\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})).$$

Если сложить данные соотношения, то получим закон Гука для объемной деформации при упругом деформировании:

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0 = K\theta, \quad (2.24)$$

откуда следует закон упругого изменения объема:

$$\theta = 3\varepsilon_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3. \quad (2.25)$$

Приравняв направляющие тензоры напряжений $(S_{ij}^*) = (S_{ij})/\sigma$ и деформаций $(\varepsilon_{ij}^*) = (\varepsilon_{ij})/\varepsilon$, которые совпадают при простом нагружении, получим формулу для выражения компонент тензора деформаций:

$$S_{ij}/\sigma = \mathfrak{E}_{ij}/\mathfrak{E} \rightarrow S_{ij} = \frac{\mathfrak{E}_{ij}}{\mathfrak{E}} \sigma, \quad (2.26)$$

$$S_{ij} = \frac{\sigma}{\mathfrak{E}} \mathfrak{E}_{ij} \text{ или } \mathfrak{E}_{ij} = \frac{\mathfrak{E}}{\sigma} S_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3).$$

Таким образом, мы получили общие законы теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина при простом нагружении [68]. Однако при сложном нагружении направляющие тензоры деформаций будут отличаться от принятых при простом нагружении на некоторые углы поворота, т. е. будут иметь вид

$$(S_{ij}/\sigma) \cdot \varphi = (\mathfrak{E}_{ij}/\mathfrak{E}) \cdot \psi. \quad (2.27)$$

В этом случае направляющие тензоры, вообще говоря, могут быть различными, но если этим пренебречь, то из их отношения получим:

$$S_{ij} = \frac{\mathfrak{E}_{ij}}{\mathfrak{E}} \sigma \psi. \quad (2.28)$$

В частном случае для простого нагружения $\varphi = \psi$ и мы приходим к соотношениям теории малых упругопластических деформаций [43]. При сложном нагружении $\varphi \neq \psi$ и возникает сложная задача о построении определяющих соотношений, к которой вернемся несколько позднее.

В работе [70] А.А. Ильюшин формулирует свой постулат изотропии о связи напряжений и деформаций при различных процессах. Связь между напряжениями и деформациями в теории процессов упругопластического деформирования материалов инвариантна, если при ортогональном преобразовании образа процесса деформирования материала все три инварианта напряженно-деформированного состояния сохраняются [43]. Поэтому при простом нагружении третий инвариант, содержащий угол φ , равен *const*. Третьи инварианты тензора-девиатора напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} J_{3\sigma} &= \frac{\sigma^3}{3\sqrt{6}} \cos 3\varphi = |S_{ij}|, \\ J_{3\varepsilon} &= \frac{\mathfrak{E}^3}{3\sqrt{6}} \cos 3\psi = |\mathfrak{E}_{ij}|. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Отношение третьих инвариантов:

$$\frac{J_{3\sigma}}{J_{3\varepsilon}} = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)^3 \frac{\cos 3\varphi}{\cos 3\psi}. \quad (2.30)$$

При простом нагружении $\varphi = \psi$, поэтому отношение третьих инвариантов от отношения, характеризующего векторные свойства, существенно не зависит, а зависит только от существования единой кривой упрочнения материалов $\sigma = \Phi(\varepsilon)$. Таким образом, общая теория малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина прямо следует из его постулата изотропии при простом нагружении. Отметим при этом, что название постулата изотропии означает гипотезу о том, что при реализации процессов упругопластического деформирования возникает деформационная анизотропия, которая оказывает слабое влияние на связь между напряжениями и деформациями начально изотропных тел, что также следует из определения теоремы о простом нагружении А.А. Ильюшина [68].

Принцип запаздывания А.А. Ильюшина утверждает, что направление вектора напряжений $\bar{\sigma}$ относительно траектории деформации определяется не всей историей процесса деформирования из начального состояния, а лишь некоторым конечным участком траектории h , именуемым следом запаздывания (памяти) [44]. Отсюда следует, что при замене участка траектории, предшествующего h , ориентация $\bar{\sigma}$ в конечной точке не изменится. Другими словами, $\bar{\sigma}$ «помнит» не всю внутреннюю геометрию траектории, а лишь некоторый участок длиной h .

Факт запаздывания скалярных свойств может быть обнаружен при сложном нагружении по двухзвенным ломаным траекториям [58, 61]. На диаграмме зависимости модуля вектора напряжений σ от длины дуги траектории s в точке излома K модуль вектора напряжений σ начинает резко уменьшаться, постепенно приближаясь к локальному экстремуму, после чего снова начинают возрастать (рисунок 2.3). После «нырка» кривая $\sigma(s)$ проходит ниже универсальной кривой $\Phi(s)$. При этом можно выдвинуть гипотезу, что

для больших углов излома $135 \leq \alpha_{b1} < \alpha_{b2} < \alpha_{b3}$ (от англ. the angle of the break) все кривые $\sigma(s)$ будут сходиться в одной точке K_0 , соответствующей вторичному пределу текучести [51].

Длина следа запаздывания скалярных свойств λ (рисунок 2.3в) определяется по диаграммам деформирования. Однако при определении величины λ существует ряд трудностей. Во-первых, запаздывание скалярных свойств проявляется тем сильнее, чем больше угол излома траектории α_{bi} (рисунок 2.3а); кроме того, не до конца ясен вклад начального деформирования в значение величины λ . Во-вторых, запаздывание модуля вектора напряжений для $\sigma(s)$ и $\sigma(\vartheta)$ характеризуется разными величинами λ и λ^* (рисунок 2.3в).

След запаздывания векторных свойств η определяется по диаграмме зависимости угла сближения ϑ_1 от длины дуги траектории s (рисунок 2.3б). След считается исчерпанным при достижении углом сближения значения $\vartheta_\eta = 0,1 \text{ рад} = 6^\circ$ [43].

Знание величин λ и η необходимо для верификации определяющих соотношений связи между напряжениями и деформациями, используемых при построении теории пластичности, обосновании базовых экспериментов и т. д. Одной из целей экспериментов, результаты которых описаны в данном исследовании, является экспериментальное определение величин длины следов запаздывания при пластическом деформировании изотропного конструкционного материала по траекториям типа смещённого веера.

6

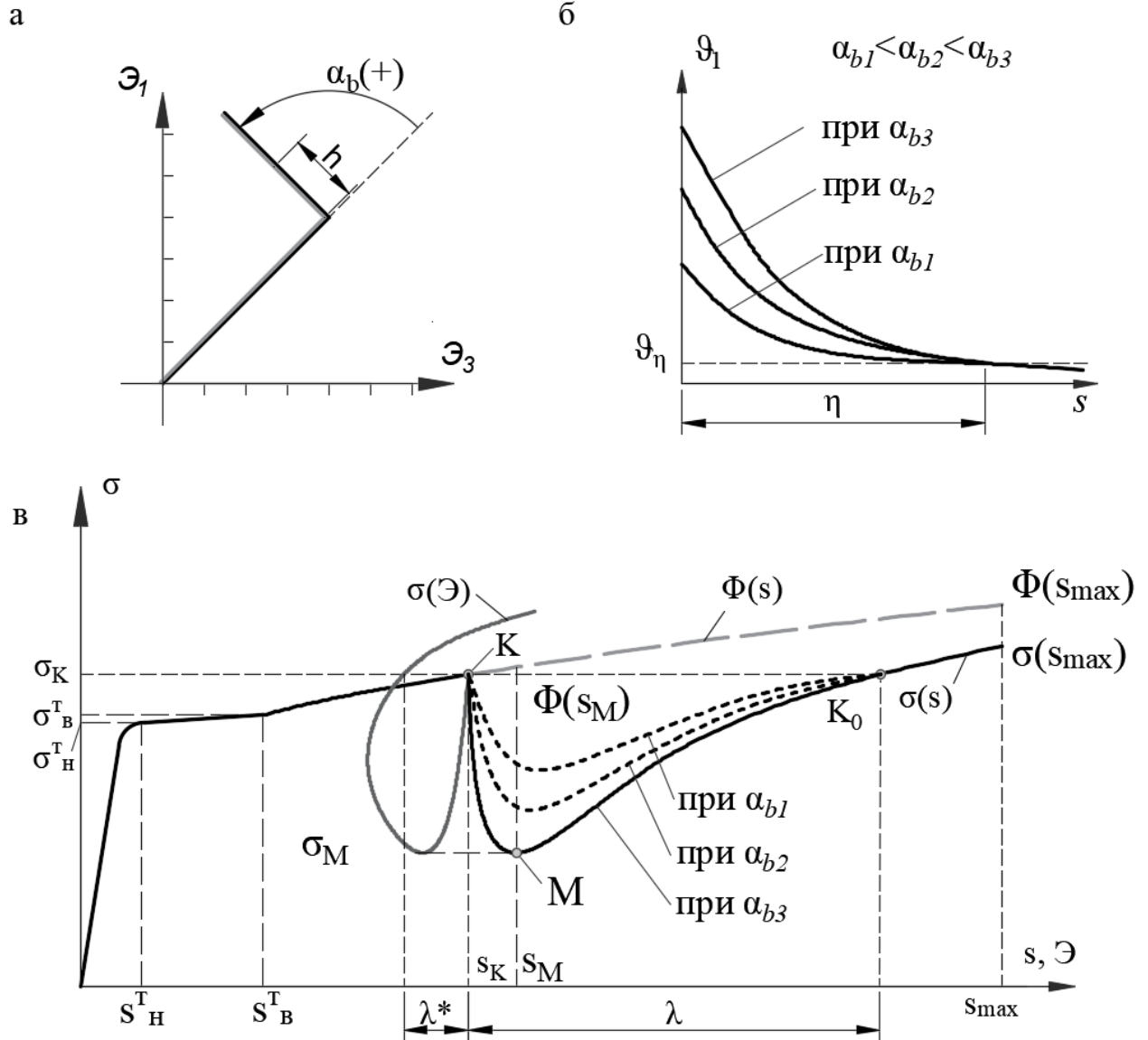


Рисунок 2.3 – Уточненный принцип запаздывания: программа (а); углы сближения (б); совмещённые диаграммы деформирования (в)

2.4. Методика обработки результатов экспериментов

Методика проведения экспериментальных исследований и обработка их результатов базируются на векторном представлении напряжений и деформаций по А.А. Ильюшину [22, 47]. Напряжённое состояние образцов – плоское, связь между модулями шаровых тензоров σ_0 и ε_0 принимается в виде зависимости

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0, \quad (2.31)$$

где $K = E/[3(1 - 2\mu)]$ – объемный модуль упругости Эйлера – Юнга;

μ – коэффициент Пуассона.

Материал считался несжимаемым, пластический коэффициент Пуассона $\mu_p \rightarrow 0,5$, объемный модуль упругости $K \rightarrow \infty$.

Компоненты тензора напряжений σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) рассчитываются по формулам [43, 55, 56]:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{P}{2\pi R h}, & \sigma_{22} &= p \frac{R}{h}, & \sigma_{33} &\approx 0, \\ \sigma_{12} &= \frac{M_{кр}}{2\pi R^2 h}, & \sigma_{13} &= \sigma_{23} \approx 0,\end{aligned}\quad (2.32)$$

где P – осевая нагрузка;

R – радиус срединной поверхности образца;

h – толщина стенки оболочки;

p – внутреннее давление;

$M_{кр}$ – крутящий момент.

Для компонент тензора деформаций ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) использовались формулы [43, 55, 56]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{\Delta l}{l}, & \varepsilon_{22} &= \frac{\Delta R}{R}, & \varepsilon_{33} &\approx 0, \\ \varepsilon_{12} &= \varphi \frac{R}{2l}, & \varepsilon_{13} &= \varepsilon_{23} \approx 0,\end{aligned}\quad (2.33)$$

где ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензора деформаций;

Δl – абсолютное удлинение рабочей части образца;

ΔR – изменение радиуса срединной поверхности образца;

φ – угол взаимного поворота сечений.

Расчет значений координат векторов напряжений S_i и деформаций ε_i ($i = 1, 2, 3$), модулей векторов напряжений σ и деформаций ε в девиаторных пространствах напряжений Σ_3 и деформаций E_3 , приращения длины дуги траектории Δs выполнялся по формулам [43, 49]:

$$\begin{aligned}
S_1 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{22}}{2} \right), \quad S_2 = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{2}} = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{2}}, \quad S_3 = \sqrt{2} S_{12} = \sqrt{2} \sigma_{12}, \\
\vartheta_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}} \varepsilon_{11}, \quad \vartheta_2 = \sqrt{2} \left(\varepsilon_{22} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11} \right), \quad \vartheta_3 = \sqrt{2} \varepsilon_{12}, \quad (2.34) \\
\sigma &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad \vartheta = \sqrt{\vartheta_1^2 + \vartheta_2^2 + \vartheta_3^2}, \quad \Delta s = \sqrt{\Delta \vartheta_1^2 + \Delta \vartheta_2^2 + \Delta \vartheta_3^2}.
\end{aligned}$$

Косинус угла отклонения ϑ_1 вектора напряжений $\bar{\sigma}$ от касательной к траектории деформирования $\vec{p}_1$ в каждой точке определялся по формуле [43]:

$$\cos \vartheta_1 = \frac{1}{\sigma} \left(S_1 \frac{d\vartheta_1}{ds} + S_2 \frac{d\vartheta_2}{ds} + S_3 \frac{d\vartheta_3}{ds} \right). \quad (2.35)$$

2.5. Математическое представление функционалов пластичности и аппроксимация процесса деформирования

Для описания исследованных в опытах процессов с учётом скалярных и векторных свойств могут быть приняты определяющие соотношения гипотезы компланарности по [43, 48]:

$$\begin{aligned}
\frac{dS_i}{ds} &= M_1 \frac{d\vartheta_i}{ds} + \left(\frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos \vartheta_1 \right) \frac{S_i}{\sigma}, \quad (2.36) \\
\frac{d\vartheta_1}{ds} + \kappa_1 &= -\frac{M_1}{\sigma} \sin \vartheta_1.
\end{aligned}$$

Функционалы, описывающие процесс $M_1, d\sigma/ds$, зависят от внутренней геометрии траектории деформирования: длины дуги траектории s , кривизны k_1 , угла в начальной точке аналитической траектории ϑ_1^0 . Для аппроксимации функций процесса $M_1, \sigma(s)$ использованы предложенные В.Г. Зубчаниновым соотношения [2]:

$$\sigma(s) = \Phi(s) + A f_0^p \Omega(\Delta s) - \Delta \sigma_k, \quad (2.37)$$

$$M_1 = 2G_p + (2G - 2G_p^0) f^q, \quad (2.38)$$

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 «нуль» у пластического модуля сдвига соответствует его значению в точке излома траектории;

$\Omega(\Delta s)$ – функция, описывающая после излома траектории скалярный выток напряжений при сложной разгрузке и последующем вторичном пластическом деформировании:

$$\Omega(\Delta s) = -[\gamma \cdot \Delta s \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} + b \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot \Delta s})], \quad (2.39)$$

$$f = \frac{1 - \cos\vartheta_1}{2}, f_0 = \frac{1 - \cos\vartheta_1^0}{2}, \quad (2.40)$$

где A, b, γ, p, q – параметры аппроксимаций, определяемые на основе базовых опытов по двухзвенным ломаным [2, 43, 48].

Проведем анализ функции $\Omega(\Delta s)$, показанной на рисунке 2.4. Вид функции Ω в зависимости от параметра b и γ приведен на рисунке 2.5.

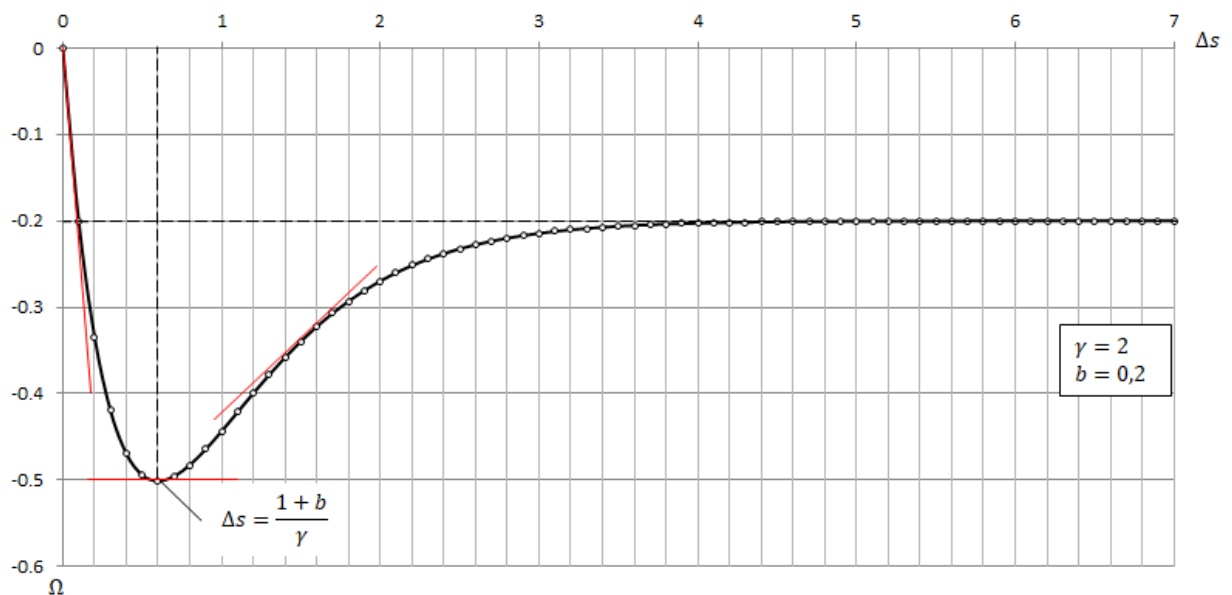


Рисунок 2.4 – График функции Ω

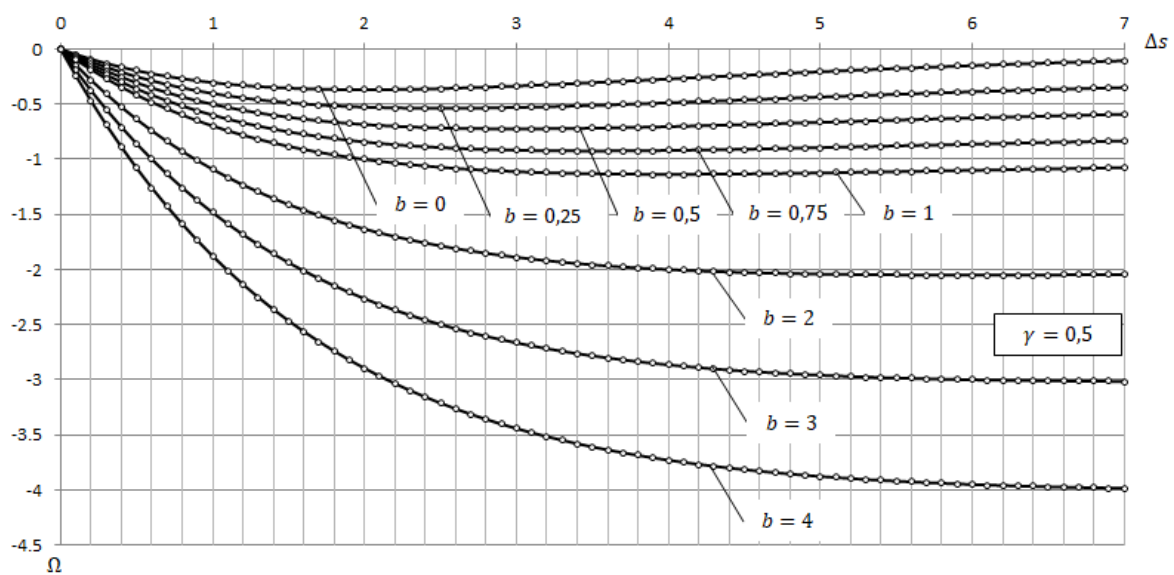
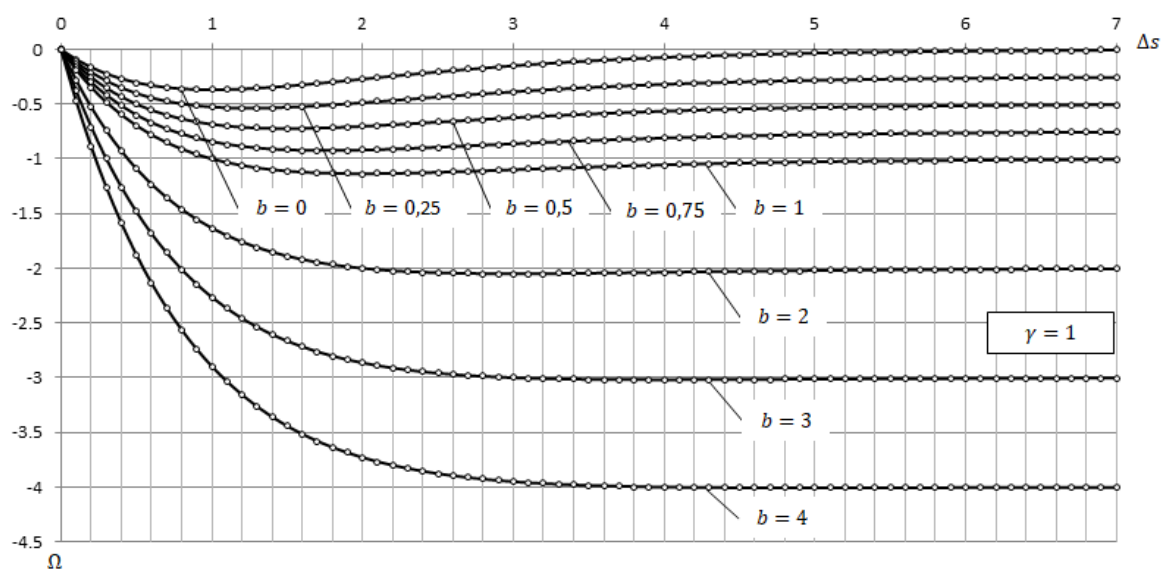
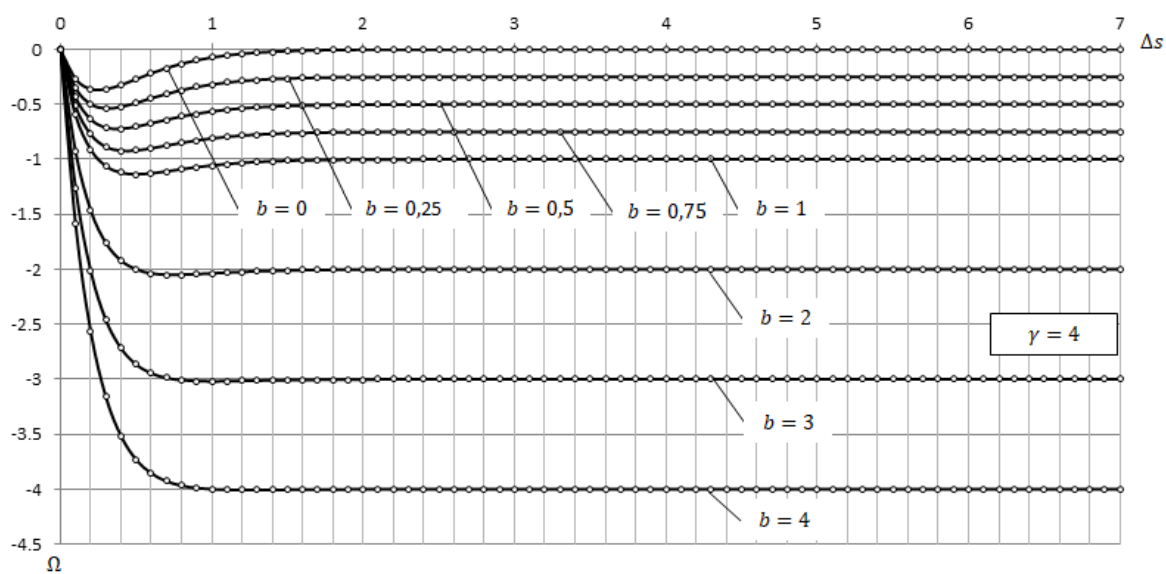


Рисунок 2.5 – Вид функции Ω в зависимости от параметра b и γ

$$\begin{aligned}\Omega' = \frac{d\Omega}{ds} &= -[\gamma \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} - \gamma^2 \cdot \Delta s \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} + \gamma \cdot b \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s}] = \\ &= -\gamma \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} \cdot (1 + b - \gamma \cdot \Delta s).\end{aligned}\quad (2.41)$$

При $\Delta s = 0$, $\Omega = 0$, $\Omega' = -\gamma \cdot (1 + b)$ функция убывает.

Точку экстремума находим из $\Omega' = 0$:

$$\begin{aligned}-\gamma \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} \cdot (1 + b - \gamma \cdot \Delta s) &= 0, \\ \Delta s &= \frac{1 + b}{\gamma}.\end{aligned}\quad (2.42)$$

При $\Delta s \rightarrow \infty$ и $\gamma > 0$ параметр b , взятый со знаком «минус», является горизонтальной асимптотой функции $\Omega(\Delta s)$:

$$\begin{aligned}\lim_{\Delta s \rightarrow \infty} \Omega(\Delta s) &= \lim_{\Delta s \rightarrow \infty} (-[\gamma \cdot \Delta s \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} + b \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot \Delta s})]) = -b, \\ \Omega' &\rightarrow \lim_{\Delta s \rightarrow \infty} (-[\gamma \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} - \gamma^2 \cdot \Delta s \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s} + \gamma \cdot b \cdot e^{-\gamma \cdot \Delta s}]) \rightarrow 0.\end{aligned}\quad (2.43)$$

Гипотеза компланарности предполагает сверхмалость параметров кручения. Для плоских траекторий можно записать:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{ds} = M_1 \hat{p}_1 + M \hat{\sigma}.\quad (2.44)$$

Рассмотрим приближенное решение дифференциального уравнения, приняв отношение M_1/σ , равное некоторому усреднённому значению:

$$-\frac{M_1}{\sigma} = a = const.\quad (2.45)$$

Приведем наше уравнение к виду с разделенными переменными, для чего разделим обе части уравнения на $\sin \vartheta_1$ и умножим на ds , при этом учтем, что $\vartheta_1 \neq 0$:

$$\frac{d\vartheta_1}{\sin \vartheta_1} = a \cdot ds.$$

Проинтегрируем обе части уравнения:

$$\int_{\vartheta_{10}}^{\vartheta_1} \frac{d\vartheta_1}{\sin \vartheta_1} = a \cdot \int_{s_k^T}^s ds,$$

$$\ln \left(\left| \tan \frac{\vartheta_1}{2} \right| \right) \Big|_{\vartheta_{10}}^{\vartheta_1} + C = a \cdot s \Big|_{s_k^T}^s + C.$$

Принимая во внимание, что $0^\circ < \vartheta_1 < 180^\circ \rightarrow 0^\circ < \vartheta_1/2 < 90^\circ \rightarrow \rightarrow \tan(\vartheta_1/2) > 0$:

$$\ln \frac{\tan(\vartheta_1/2)}{\tan(\vartheta_{10}/2)} = a \cdot (s - s_k^T), \quad \frac{\tan(\vartheta_1/2)}{\tan(\vartheta_{10}/2)} = e^{a \cdot (s - s_k^T)},$$

$$\vartheta_1 = 2 \cdot \tan^{-1} \left[\left(\tan(\vartheta_{10}/2) \cdot e^{a \cdot (s - s_k^T)} \right) \right]. \quad (2.46)$$

На рисунке 2.6 приведен характерный вид функций, полученных по формуле (2.46), для различных значений параметра a для углов сближения с шагом 15° .

При рассмотрении процессов простого нагружения в качестве универсального закона упрочнения часто применяют закон Одквиста – Ильюшина $\sigma = \Phi(s)$ либо Роша – Эйхингера $\sigma = \Phi(\varepsilon)$, которые не учитывают внутренние параметры траекторий деформирования, такие как кривизна и угол излома траектории.

Для аппроксимации универсальной функции Одквиста – Ильюшина материала с площадкой текучести использовались выражения [49]:

$$\sigma = \Phi(s) = \begin{cases} 2Gs, & \text{при } s \leq s_H^T & \text{участок I} \\ \sigma^T, & \text{при } s_H^T \leq s \leq s_B^T & \text{участок II} \\ \sigma^T + \sigma_a \cdot (1 - e^{-\beta \cdot (s - s_B^T)}), & \text{при } s > s_B^T & \text{участок III} \end{cases} \quad (2.47)$$

Для материала без площадки текучести можно принять [49]:

$$\sigma = \Phi(s) = \begin{cases} \frac{2G}{\alpha} (1 - e^{-\alpha s}), & \text{при } s \leq s^T \\ \sigma^T + 2G_*(s - s^T) + \sigma_*(1 - e^{-\beta(s - s^T)}), & \text{при } s > s^T \end{cases}, \quad (2.48)$$

$$\sigma^T = \sqrt{2/3} \sigma_T,$$

где σ_T – предел текучести при растяжении;

s^T – граница участка диаграммы деформирования, разделяющая упругую часть и площадку текучести от участка самоупрочнения материала;

$\sigma_a, G_*, \sigma_*, \alpha, \beta$ – экспериментально определяемые параметры материала из опытов на простое нагружение.

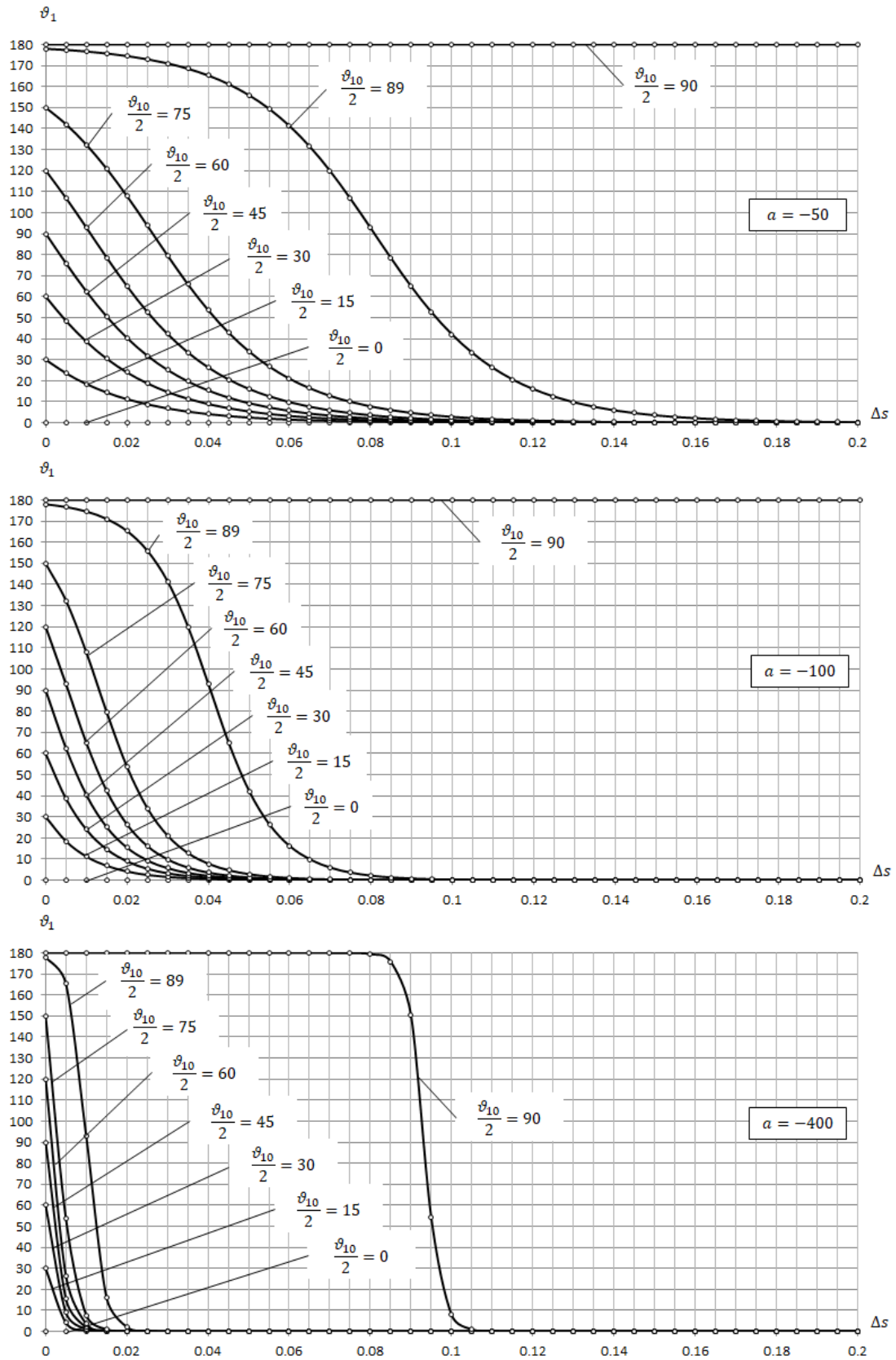


Рисунок 2.6 – Значения угла сближения ϑ_1 в зависимости от параметра α

В случае различных значений предела текучести при растяжении в начале s^T_H и в конце площадки текучести s^T_B дополнительно могут быть введены верхнее σ^T_B и нижнее σ^T_H значения. Общая диаграмма прослеживания процесса деформирования $\sigma(s)$ в таком случае, а также универсальная функция $\sigma = \Phi(s)$ представлены на рисунке 2.7 [1, 43]. Точка излома траектории обозначена K , точка максимальной глубины «нырка» – M .

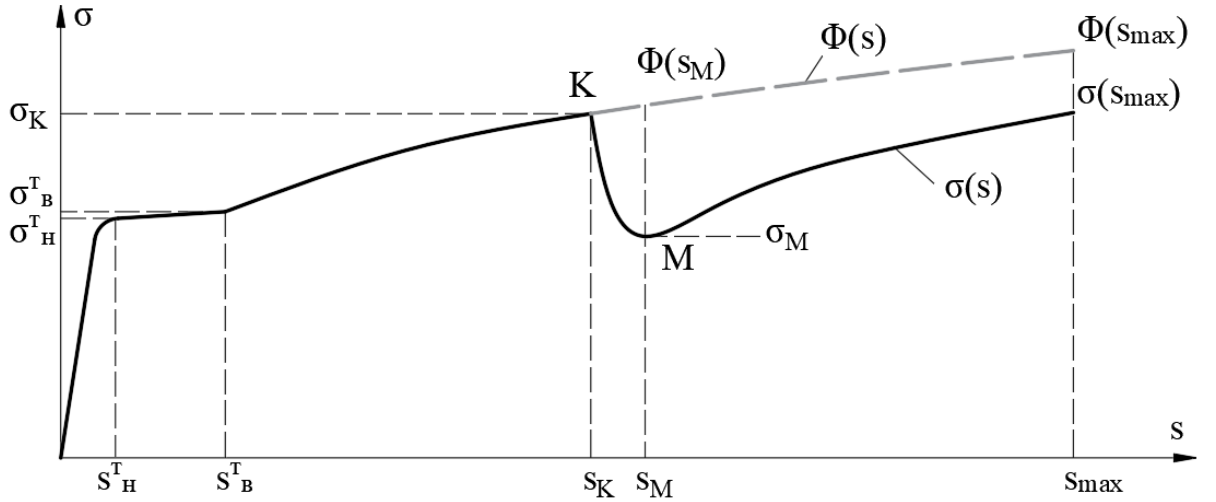


Рисунок 2.7 – Схема к определению параметров аппроксимаций функционалов

Для вычисления параметров могут использоваться выражения [1]:

$$\omega = \frac{\Phi(s_{max}) - \sigma(s_{max})}{\Phi(s_M) - \sigma(s_M)} = \frac{b}{b + e^{-(1+b)}}, \quad (2.49)$$

$$b = LambertW\left(-\frac{\omega e^{-1}}{\omega - 1}\right), \quad (2.50)$$

$$A = \frac{\Phi(s_{max}) - \sigma(s_{max})}{bf_0^p}, \quad (2.51)$$

$$\gamma = \frac{d\Phi_0/ds + 2G}{A(1+b)} = \frac{bf_0^p(d\Phi_0/ds + 2G)}{[\Phi(s_{max}) - \sigma(s_{max})](1+b)}, \quad (2.52)$$

позволяющие при найденном значении параметра b и различных показателях степени p найти спектр значений параметров A, b, γ , выбор которых определяется наилучшим соответствием данным базового опыта.

При заданных начальных условиях для координат вектора деформаций $\mathcal{E}_k (k = 1,3)$ 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 [1, 43].

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Описание установки для изучения поведения материалов за пределом упругости при сложном нагружении

Для исследования материалов в условиях сложного многопараметрического нагружения необходимы универсальные испытательные машины, способные его реализовать. В России подобные установки существуют в Институте проблем сверхпластичности металлов (ИПСМ РАН) – установка сложного нагружения СНТ10БД, в Тверском государственном техническом университете – комплекс СН-ЭВМ; среди зарубежных можно выделить машины фирм Instron MTS (США), Shimadzu (Япония), Zwick (Германия) и др.

Первые машины, рассчитанные на сложное нагружение, созданные в Геттингенском университете (Германия) в первой половине XX века, работали по принципу задания определенной нагрузки (силовой тип). Необходимость повышения точности измерений на коротких промежутках времени в области пластичности в середине прошлого века привела к созданию машин кинематического типа (контролирующих перемещения) в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Институте механики РАН, Институте механики НАН Украины, ЦНИИМАШ и ряде других научно-исследовательских центрах [55]. В конце 70-х годов XX века в Калининском политехническом институте под руководством профессора Владимира Георгиевича Зубчанинова на базе универсальной испытательной машины ЦДМУ-30 был создан автоматизированный экспериментальный комплекс СН-ЭВМ [40]. В 80-е годы Алексей Антонович Ильюшин лично анализировал работу комплекса и детально изучал получаемые фундаментальные результаты. Позже сотрудниками кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности В.А. Филиновым, В.Г. Харитоновым,

А.В. Акимовым, Н.Л. Охлопковым, Д.Е. Ивановым, А.П. Андреевым, В.И. Гультияевым и другими в конструкцию был внесен ряд изменений, благодаря чему процесс испытаний стал полностью автоматизированным.

Экспериментальный комплекс включает механическую часть, гидроприводы осевого усилия и внутреннего давления, автономный блок управления и компьютер. На рисунке 3.1 представлен общий вид механической части СН-ЭВМ.

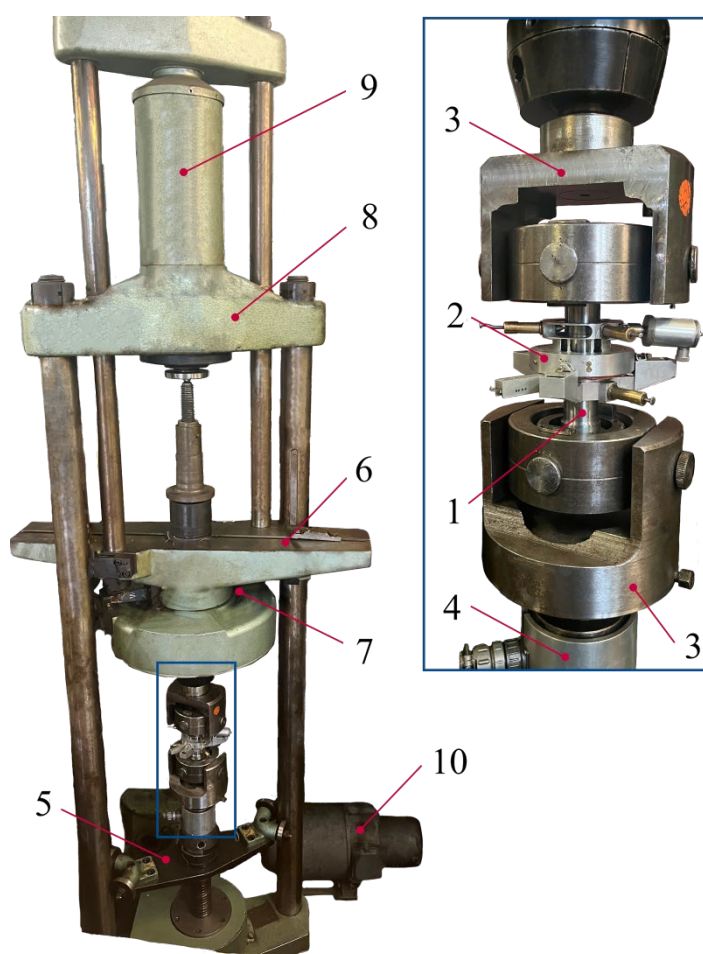


Рисунок 3.1 – Общий вид механической части машины СН-ЭВМ:

- 1 – образец для испытания; 2 – дифференциальный тензометр;
- 3 – захватные приспособления; 4 – двухкомпонентный силоизмеритель;
- 5 – нижняя траверса; 6 – верхняя траверса; 7 – двигатель привода кручения;
- 8 – неподвижная траверса гидроцилиндра; 9 – гидроцилиндр;
- 10 – двигатель механического привода осевого усилия.

Действующие на образец осевая нагрузка и крутящий момент измеряются двухкомпонентным силоизмерителем (рисунок 3.2а [55, 104, 123]). Поперечные деформации измеряются при помощи тензомера поперечных деформаций (рисунок 3.2б). Осевые, окружные и сдвиговые перемещения тонкостенных цилиндрических оболочек – при помощи специального экстензометра (рисунок 3.2в) [56, 60].

Силоизмеритель (рисунок 3.2а) состоит из круглой сочленённой мембраны (1), обеспечивающей устойчивость к изгибным деформациям, шести перемычек (2), двух жестких колец (3) и вала (5), через который передается нагрузка. Для измерения усилий на мембране и перемычках размещены тензорезисторы (4). Верхнее кольцо прибора через фланцевое соединение объединяется с захватным приспособлением. Для градуировки измеряемых прибором осевых нагрузок применяются эталонные динамометры и специальное рычажное устройство для крутящих моментов [55, 56].

Интегральные характеристики измеряются при помощи тензомера поперечных деформаций, состоящего из обоймы и закрепленного в ней индуктивного датчика (рисунок 3.2б). Обойма фиксируется в экстензометре при помощи металлической струны, обхватывающей образец. При изменении радиуса образца струна перемещает обойму, что приводит в движение шток индуктивного датчика [55, 56].

Дифференциальный тензометр (рисунок 3.2в) состоит из двух колец (6), в каждом из которых находится по три стальные втулки (8), расположенные под углом 120° . База прибора составляет $50 + 0,1$ мм. Внутрь втулок устанавливаются иглы, перемещающиеся без зазоров и люфтов. На наружной поверхности втулок сделана нарезка, на которую навинчивается колпачок. В полости каждой иглы размещается пружинка, прижимающая иглу к образцу при закручивании колпачка. За счет этого достигается надежное крепление колец на образце и производится незначительное надавливание игл при

увеличении диаметра образца. Осевое перемещение и угол поворота при закручивании образца определяются по смещению верхней части относительно нижней упругими элементами с тензорезисторами (7) [55, 56].

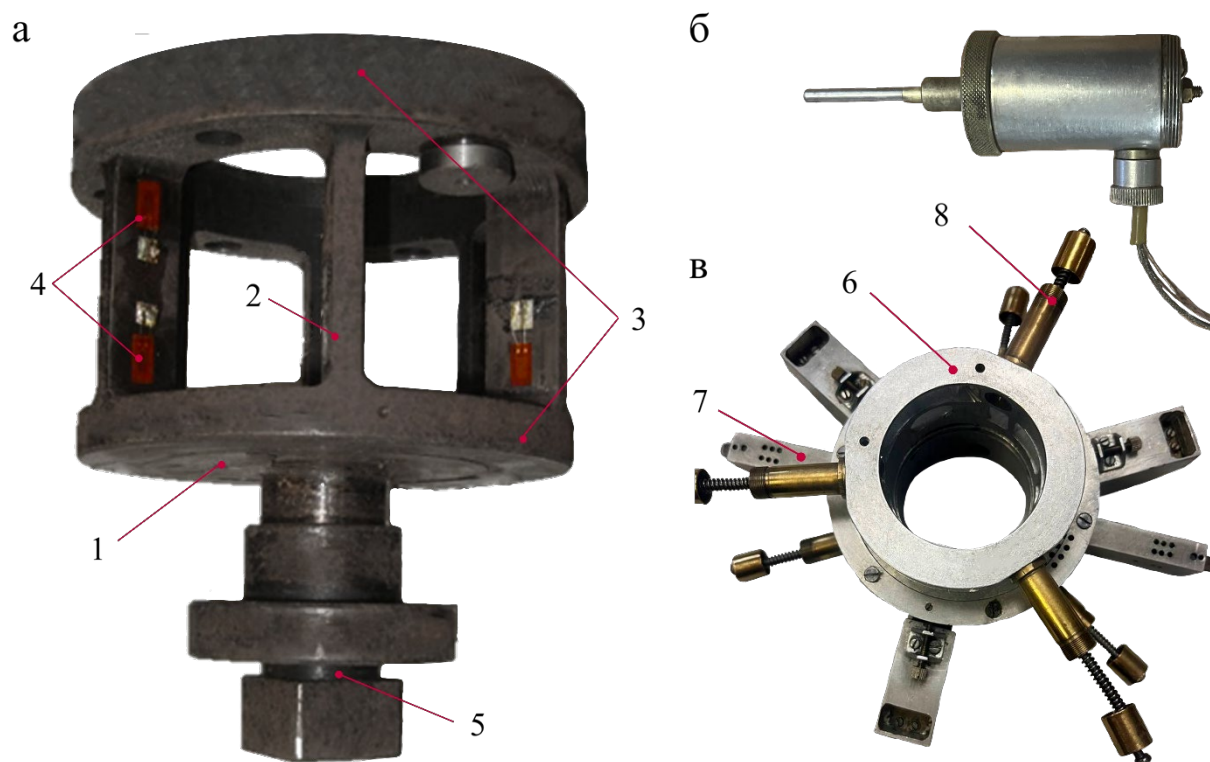


Рисунок 3.2 – Регистрирующие приборы:
двухкомпонентный силоизмеритель (а); датчик поперечных деформаций (б);
экстензометр (в)

Для предотвращения смещения и возможного перекоса колец при монтаже прибора на образец используется специальное приспособление в виде ступки, в которую вертикально устанавливается образец. Между образцом и стенками ступки устанавливаются специальные фиксирующие детали – сухари, внутренний диаметр которых выдержан по наружному диаметру образца. Верхние и нижние сухари имеют выступы, на которые в процессе монтажа опираются кольца с иглами. Высота колец подобрана таким образом, что при отсутствии зазора между ними оси игл лежат в параллельных

плоскостях, отстоящих друг от друга на расстояние 50 мм. После того как иглы должным образом поджаты к образцу, сначала снимаются верхние сухари, а затем нижние. Перед установкой на образец тензометр градуируется на специальном устройстве, изготовленном на базе теодолита Т-30 [55, 56].

Захватные приспособления (3) (см. рисунок 3.1) состоят из верхней корпусной вилки, закрепленной на верхней неподвижной траверсе, нижней корпусной вилки, которая через силоизмеритель закреплена на нижней подвижной траверсе, и двух колец (рисунок 3.3), образующих крестообразный шарнир Гука. Кольца имеют параллельные сквозные круглые отверстия, которые совмещаются с аналогичными полусекторными лысками на головках образца. В отверстия устанавливаются ролики, имеющие эксцентриковые поверхности для достижения надежной передачи усилий на образец. Такая конструкция позволяет захватам самоустанавливаться под действием приложенных нагрузок и исключает влияние эксцентриситета приложения осевой силы. Кроме того, захваты легко разбираются, что облегчает монтаж-демонтаж испытательного модуля [55, 56].

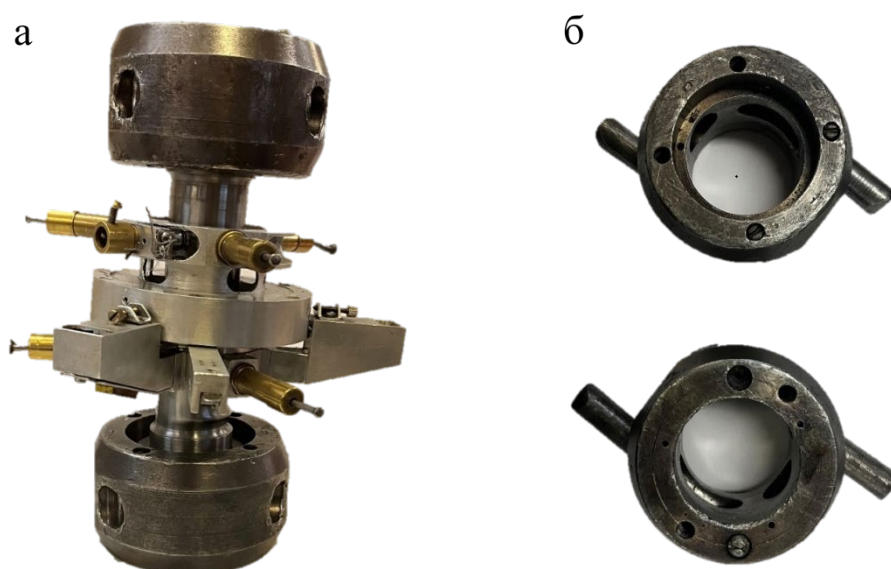


Рисунок 3.3 – Образец с установленным дифференциальным тензометром после испытаний (а) и закрепленные кольца захвата (б)

Нагружение внутренним давлением в комплексе СН-ЭВМ реализовано при помощи жесткого цилиндрического сердечника, который помещается внутрь образца. На торцах приспособления имеются уширения с герметизирующими элементами. Данное решение позволяет более точно управлять осевой нагрузкой, поскольку растягивающее усилие от внутреннего давления компенсируется сердечником. В таблицу 3.1 сведены диапазоны измерений параметров, регистрируемых всеми описанными приборами, и их погрешности [55, 56].

Таблица 3.1 – Параметры автоматизированного комплекса СН-ЭВМ [55]

Регистрирующее устройство	Регистрируемый параметр	Диапазон работы	Погрешность измерения, не более
Двухкомпонентный силоизмеритель	Осевая нагрузка	60 кН	$\pm 0,12$ кН
	Крутящий момент	0,5 кН · м	± 3 Нм
Дифференциальный тензометр	Осевое перемещение	2 мм	$\pm 6 \cdot 10^{-3}$ мм
	Угол поворота образца	0,25 рад	$\pm 7 \cdot 10^{-4}$ рад
	Радиальное перемещение	$\pm 0,6$ мм	$\pm 3 \cdot 10^{-3}$ мм
Датчик давления	Внутреннее давление	30 МПа	$\pm 0,2$ МПа

Для задания и контроля параметров эксперимента используется компьютер и блок управления (рисунок 3.4). Настройка параметров эксперимента осуществляется на автономном блоке управления (1) (рисунок 3.4). Данный элемент комплекса позволяет устанавливать скорость нагружения либо деформирования, изменять дискретность регистрации информации с датчиков механической части, регулировать механизмы предотвращения обратного хода приводов и режимы стабилизации нагрузок.

Программа, управляющая экспериментом, содержит информацию о режиме управления, количестве участков траектории нагружения или деформирования и их типе. Для создания и редактирования программ

используется интегрированная среда разработки и компилятор для языка программирования Basic. Программа эксперимента может быть подготовлена заранее (в этом случае она загружается оператором с внешнего носителя) или получена путем внесения изменений с клавиатуры в существующий файл. Вся необходимая информация о реализуемом процессе в режиме реального времени отображается на мониторе компьютера (3) (рисунок 3.4) и автоматически с заданными оператором временными интервалами записывается в постоянную память компьютера в виде файла данных.

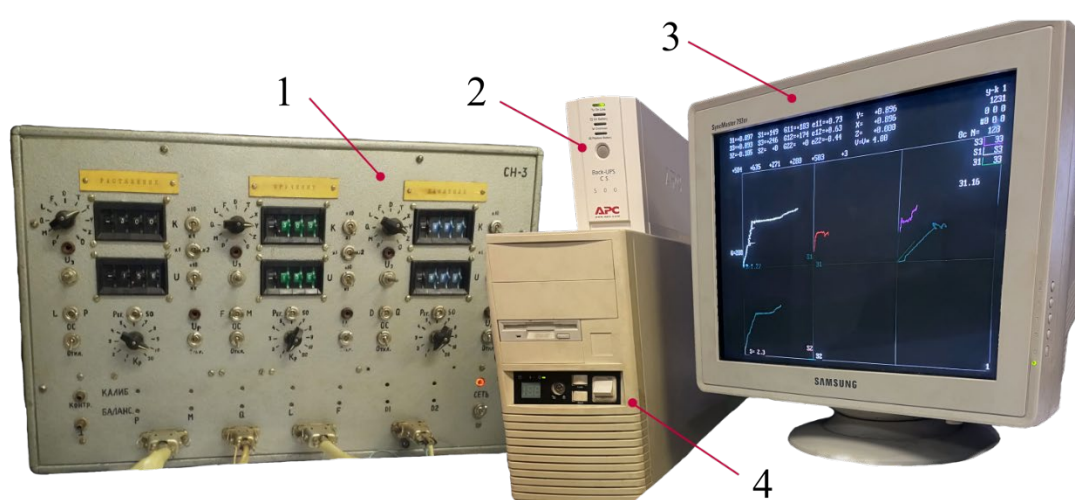


Рисунок 3.4 – Компьютер и автономный блок управления:

1 – блок управления; 2 – источник бесперебойного питания; 3 – монитор;
4 – системный блок

Проведение эксперимента начинается с ввода исходных параметров. Оператор задает режим управления по нагрузкам или деформациям, устанавливает скорость нагружения и выбирает программу испытания. Траектории могут быть плоскими или пространственными, состоять из одного участка или быть многозвенным, иметь вид окружностей, спиралей, винтовых линий и др., постоянной и переменной кривизны, быть открытыми или замкнутыми [41, 52]. Траектория заданной сложности разбивается на участки, которым назначают длину, угол наклона, радиус, количество витков и т. д.

Переход на следующий участок может осуществляться автоматически или вручную [55, 56].

Обеспечение предпусковых операций заключается в проверке корректности задания начальных условий, правильности функционирования всех элементов системы (приводов, приборов, приспособлений). После проверки работоспособности всех систем дается команда о начале эксперимента.

В процессе эксперимента непрерывно происходит формирование массива измерительной информации, сбором и обработкой которой занимается программа, управляющая коммутатором и аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Процесс анализа условий позволяет принимать решение о переходе на следующий участок, изменении параметров эксперимента или об аварийной остановке.

Функциональная схема для графического отображения основных элементов комплекса и их связей представлена на рисунке 3.5 [55, 56].

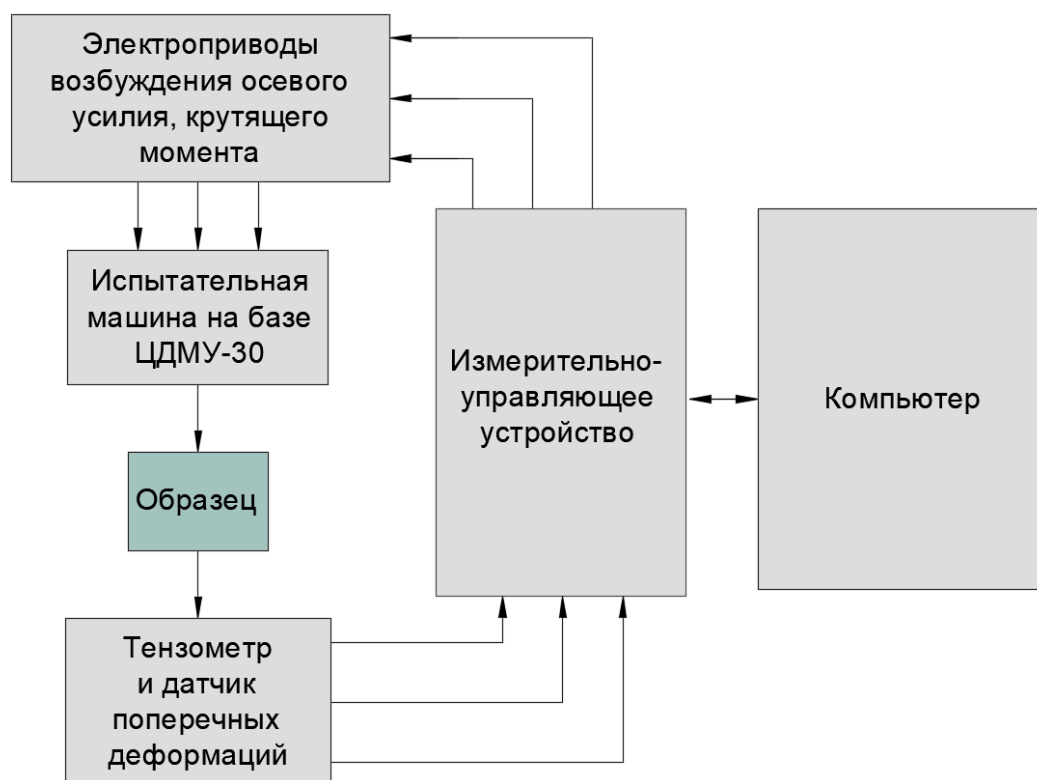


Рисунок 3.5 – Функциональная схема комплекса

Процесс реализации экспериментального исследования представлен на блок-схеме (рисунок 3.6 [55]).

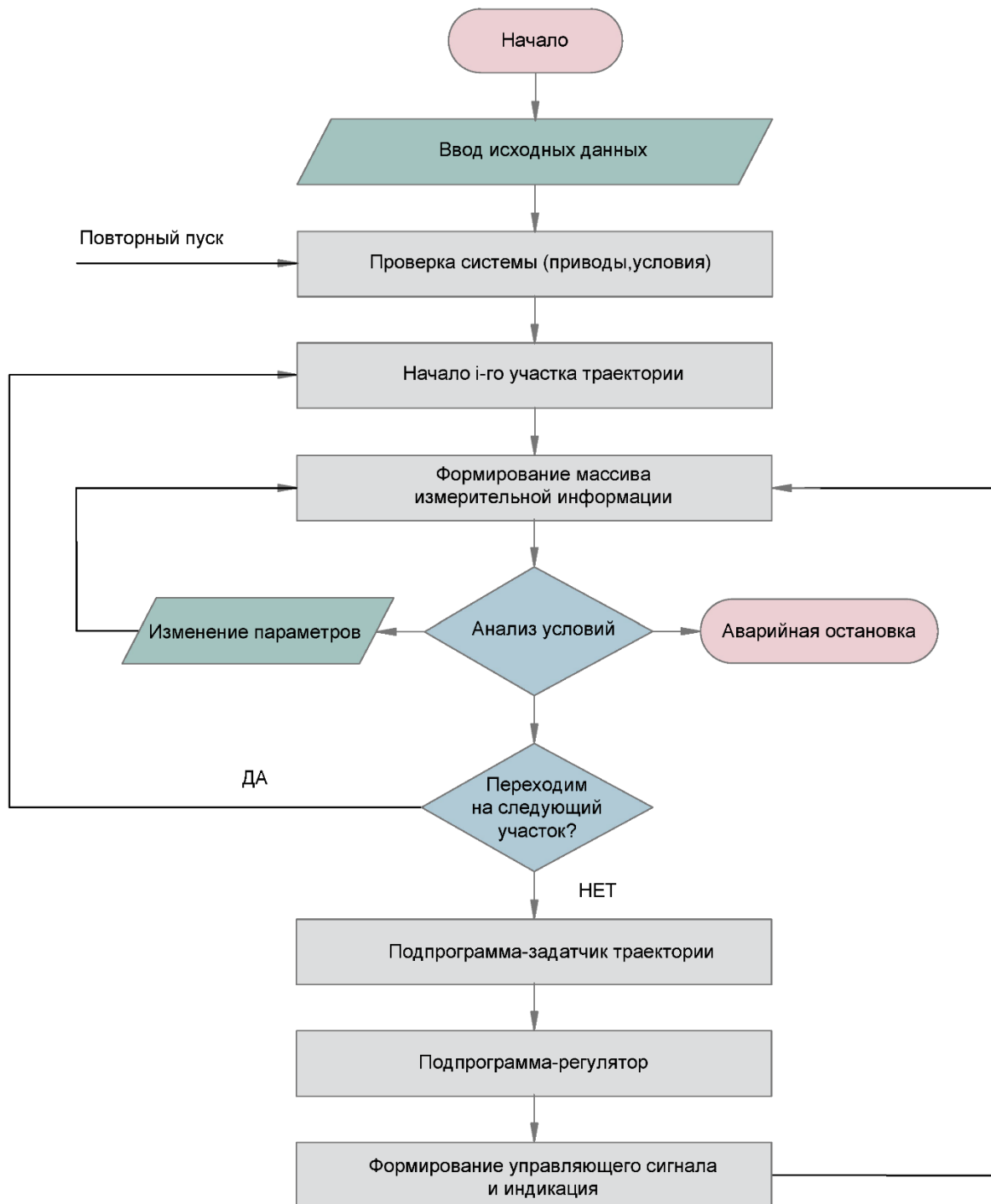


Рисунок 3.6 – Блок-схема управления комплексом

Для корректировки функций, задающих траекторию, используется подпрограмма – задатчик траектории, которая на основе анализа полученного массива информации производит расчет и формирует параметры для управления процессом. Подпрограмма-регулятор сравнивает заданные (требуемые) и текущие значения, формирует сигнал, который через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) поступает в управляющий блок комплекса, после чего цикл замыкается. После индикации начинается новый цикл анализа данных [55, 56].

Блок-схема программной части системы наряду с предыдущим описанием комплекса позволяет комплексно оценить методику проведения экспериментального исследования, а система контроля дает возможность обеспечить точность, достоверность и безопасность проведения испытаний.

3.2. Планирование эксперимента: выбор материала, описание образцов и условий проведения опытов

Основная цель эксперимента – получение объема опытных данных для траекторий с различными углами излома (в том числе отраженных) при разной степени начального простого деформирования. Условия проведения экспериментов нормальные: температура порядка 20 – 25 °С, атмосферное давление около 101,3 кПа (760 мм рт. ст.), экстремальные воздействия, такие как высокая влажность, агрессивные химические среды, крайне низкие или высокие температуры, вибрации и ударные нагрузки, отсутствовали. Чтобы исключить влияние скорости деформирования на результаты упругопластического деформирования, во время проведения эксперимента скорость поддерживалась на уровне порядка $5 \cdot 10^{-6}$ 1/с.

В качестве материала выбрана стандартная углеродистая конструкционная изотропная сталь 45, широко используемая в машиностроении и других отраслях промышленности. Химический состав материала по результатам спектрального анализа Foundry Master представлен

в таблице 3.2 (см. Приложение Г) и соответствует изотропной стали марки 45 (ГОСТ 1050-2013).

Таблица 3.2 – Химический анализ материала

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
						Не более		
Сталь 45	0,42–	0,17–	0,5–0,8	0,030	0,035	0,25	0,30	0,30
ГОСТ- 1050	0,5	0,37						
Хим. состав	0,44	0,268	0,612	0,0126	0,0107	0,0583	0,0205	0,0374

Для обеспечения постоянства свойств материала все оболочки изготавливались из одного прутка диаметром 52 (50) мм длиной 6 м (см. Приложение Д). Эксперименты проводили на тонкостенных цилиндрических образцах длиной 200 мм, с диаметром срединной поверхности 31 мм и толщиной стенки на длине рабочей части 1 мм. Таким образом, количество испытаний серии экспериментов было ограничено длиной прутка исходного материала. Технологический процесс изготовления оболочек включал отрезку заготовок с припуском для обработки, центрирование (для обеспечения соосности при дальнейшей обработке) и черновую токарную обработку с уменьшением диаметра центральной части, высверливание центрального отверстия, растачивание и чистовую обработку внутренней поверхности, проточку утолщений на краях, а также обработку торцов площадок под захват [55, 56].

Внутренняя и наружная поверхности оболочек обрабатывались по седьмому классу точности, полировка и термообработка не проводились, готовые заготовки подвержены естественному старению в течение ряда лет. Форма и размеры испытательных образцов показаны на рисунке 3.7.

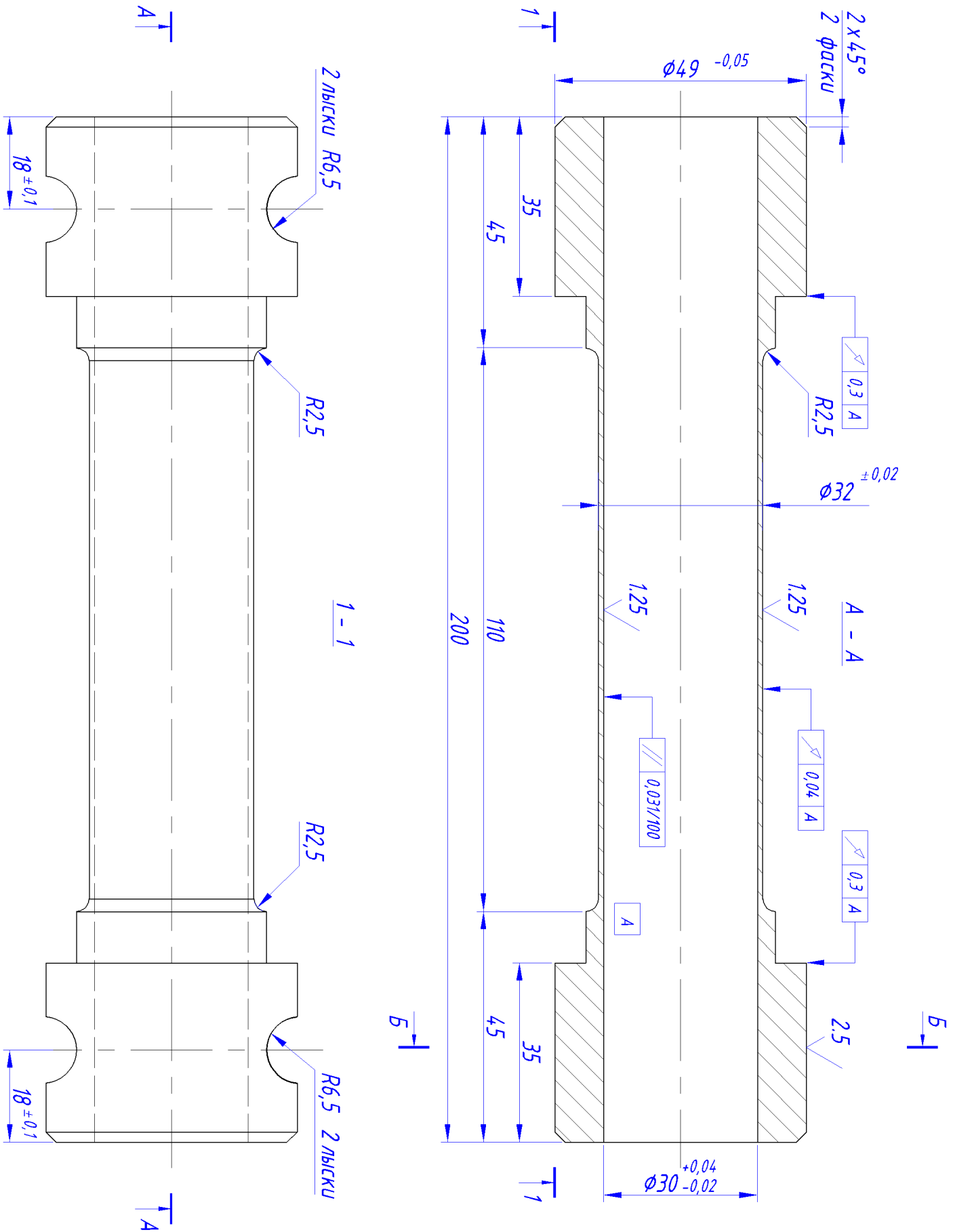
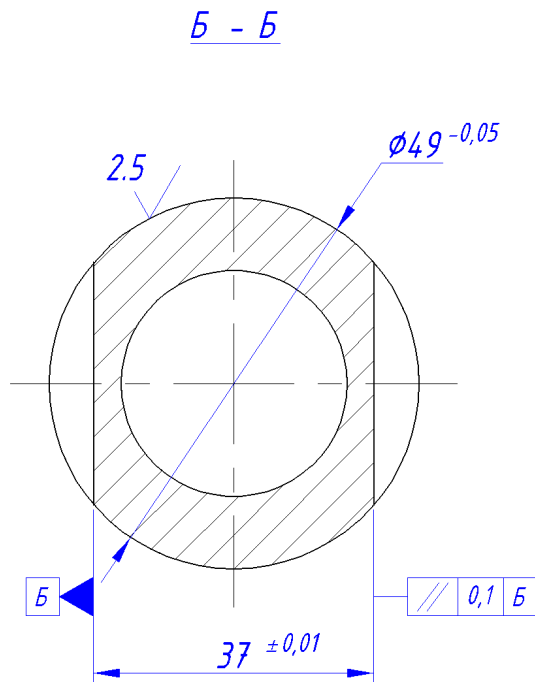


Рисунок 3.7 – Образец для испытания (М1:1)



Примечание:

1. Изготовить 27 образцов из одного прутка длиной 6 м диаметром 50 мм;
2. Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстий H12, валов h12, прочих $\pm \frac{IT12}{2}$.

Рисунок 3.7 – Продолжение [55, 56]

Перед каждым экспериментом производились обмерные работы. Контроль геометрических параметров образцов производился при помощи микрометров, штангенциркуля и специального приспособления для измерения толщины стенки (рисунок 3.8), шероховатость поверхности устанавливалась визуально.

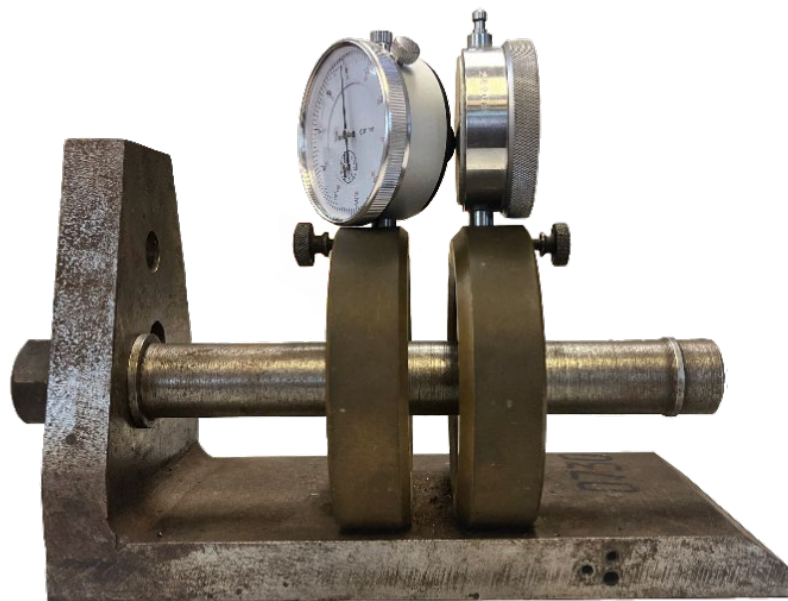


Рисунок 3.8 – Прибор для измерения толщины стенки

В таблице 3.3 приведены результаты замеров внешнего диаметра D и толщины стенки образцов h , а также радиус R срединной поверхности, вычисленный по формуле

$$R = \frac{D}{2} - \frac{h}{2}. \quad (3.1)$$

Таблица 3.3 – Геометрические параметры оболочек

№	$D \cdot 10^3, \text{м}$	$h \cdot 10^3, \text{м}$	$R \cdot 10^3, \text{м}$
1	$31,98 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,02$
2	$32,02 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,02$	$15,51 \pm 0,02$
3	$31,98 \pm 0,01$	$0,98 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,02$
4	$31,98 \pm 0,01$	$0,98 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,03$
5	$32,00 \pm 0,02$	$1,02 \pm 0,02$	$15,49 \pm 0,03$
6	$32,02 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,04$	$15,54 \pm 0,05$
7	$32,02 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,02$	$15,51 \pm 0,02$
8	$31,98 \pm 0,03$	$0,95 \pm 0,07$	$15,52 \pm 0,08$
9	$31,99 \pm 0,02$	$0,98 \pm 0,03$	$15,51 \pm 0,03$
10	$32,01 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,03$	$15,51 \pm 0,03$
11	$32,00 \pm 0,03$	$0,96 \pm 0,03$	$15,52 \pm 0,04$
12	$32,00 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,02$	$15,51 \pm 0,03$
13	$32,01 \pm 0,02$	$1,00 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,03$
14	$32,02 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,02$	$15,51 \pm 0,03$
15	$32,02 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,03$	$15,51 \pm 0,03$
16	$32,02 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,02$	$15,51 \pm 0,02$
17	$32,01 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,02$
18	$31,98 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,03$
19	$31,99 \pm 0,02$	$0,95 \pm 0,04$	$15,52 \pm 0,04$
20	$31,98 \pm 0,01$	$0,99 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,02$
21	$32,00 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,02$	$15,50 \pm 0,02$
22	$31,97 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,03$	$15,49 \pm 0,03$
23	$31,98 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$	$15,49 \pm 0,02$

Программа эксперимента (таблица 3.4) включает четыре группы испытаний. Первая группа – центральный веер состоит из различных видов простого деформирования, данная серия позволяет оценить начальную изотропию/анизотропию материала. Вторая и третья группы представляют собой пропорционально смещённые веера с изломами при различной величине участка начального деформирования, с целью изучения его влияния на длину следа запаздывания и другие исследуемые параметры. Четвертая

группа включает дополнительные опыты при больших углах излома траектории для получения данных о процессах сложного деформирования и уточнения применяемых математических моделей.

Таблица 3.4 – Программа эксперимента

№ образца	Вид нагружения до излома	Угол излома траектории	Вид деформирования после излома	Группа
1	Растяжение	–	Растяжение	Центральный веер
2	Кручение	–	Кручение	
3	Сжатие	–	Сжатие	
4	Растяжение с кручением	–	Растяжение с кручением	
5	Сжатие с кручением	–	Сжатие с кручением	
20 (6)	Растяжение с кручением	45	Растяжение	Смещённый веер 1 % ($\vartheta_1 = \vartheta_3 = 1\%$)
7	То же	–45	Кручение	
8	То же	–135	Сжатие	
9	То же	–90	Сжатие с кручением	
10	То же	135	Реверсивное кручение	
11	То же	90	Растяжение с реверсивным кручением	
12	То же	90	Растяжение с реверсивным кручением	Смещённый веер 2 % ($\vartheta_1 = \vartheta_3 = 2\%$)
13	То же	–90	Сжатие с кручением	
14	То же	135	Реверсивное кручение	
15	То же	–135	Сжатие	
16	То же	–45	Кручение	
17	То же	180	Простая разгрузка	
18	То же	45	Растяжение	Смещённый веер 1 % ($\vartheta_1 = \vartheta_3 = 1\%$) большие углы излома
19	То же	180	Простая разгрузка	
21	То же	150	Сжатие с реверсивным кручением	
22	То же	165	Сжатие с реверсивным кручением	
23	То же	–150	Сжатие с реверсивным кручением	

Примечание: образец № 6 не прошел проверку геометрических параметров.

На рисунках 3.9–3.11 приведены образцы после испытаний.



Рисунок 3.9 – Образцы после испытаний, центральный веер



Рисунок 3.10 – Образцы после испытаний, веер 2 %



Рисунок 3.11 – Образцы после испытаний, веер 1 %

3.3. Методы верификации экспериментальных данных

Для того чтобы убедиться в том, что полученные выводы не являются ошибочными или случайными, обеспечить объективность и воспроизводимость результатов, заложить надежную основу для дальнейших исследований, проводилась проверка надежности и достоверности. Верификация включала статистическую обработку данных (вычисление средних значений, дисперсии, стандартного отклонения, анализ выбросов и т. д.), сравнение с независимыми источниками и использование различных методов для измерения одного и того же параметра, анализ погрешности с выявлением случайных и систематических ошибок. Поскольку число испытаний ограничено, важно дать оценку точности полученных результатов с применением методов теории вероятности и математической статистики.

Число точек измерений в каждом опыте составляло от 325 до 1195 в зависимости от траектории деформирования. Длина реализуемых траекторий по локальным направлениям была ограничена диапазоном работы приборов (см. таблицу 3.1). Время проведения экспериментов варьировалось от 44 мин до 2 ч 49 мин. Средняя скорость записи – 7 точек в минуту.

Для оценки математического ожидания $M(X)$ использовалось среднее арифметическое значение выборки, которое при большом числе измерений ($n > 30$) приближенно равно среднему значению $\langle x \rangle \approx \bar{x}$:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \approx \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.2)$$

где n – число измерений.

Для оценки величины разброса данных рассчитывалась величина несмещённой (исправленной) выборочной дисперсии:

$$D(x) = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2 - n \leq 30. \quad (3.3)$$

Смещённая выборочная дисперсия

$$D(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2 - \text{при } n > 30. \quad (3.4)$$

Среднее квадратичное отклонение выборки

$$s = \sqrt{D(x)}. \quad (3.5)$$

При большом числе измерений согласно закону больших чисел можно записать:

$$\varsigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\langle (x_i - \langle x \rangle)^2 \rangle}{n - 1} = \overline{x^2} - \bar{x}^2. \quad (3.6)$$

Многократные измерения позволили избавиться от случайных ошибок или уменьшить их влияние. Для определения необходимого числа опытов сравнивались значения погрешности отдельного измерения $\Delta x_{\text{отд}}$ и погрешности среднего $\Delta x_{\text{ср}}$:

$$\Delta x_{\text{отд}} \equiv \varsigma_{\text{отд}} \approx s = \sqrt{\langle (x_i - \langle x \rangle)^2 \rangle} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \varsigma_{\text{отд}}, \quad (3.7)$$

$$\Delta x_{\text{ср}} = \varsigma_{\langle x \rangle} = \dots \approx \frac{s_{\text{отд}}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \underline{0!}. \quad (3.8)$$

Систематические погрешности нельзя устранить увеличением числа испытаний, поэтому за достаточное число измерений можно принять то, при котором случайная ошибка имеет порядок систематической. Для превращения систематической ошибки в случайную необходимо проводить независимую проверку результатов измерений с использованием альтернативных методов или оборудования.

Для оценки случайных погрешностей измерений используется вероятностный интервал. В физике обычно принимается доверительная вероятность $P = 0,68$ ($M \pm \varsigma$), в технике $P = 0,95$ ($M \pm 2\varsigma$) или $P = 0,997$ ($M \pm 3\varsigma$) и более в критически важных отраслях, где ошибки недопустимы. Соответствующий уровень значимости, при котором различия

между выборочными значениями можно считать несущественными, обозначается $\alpha = 0,32; 0,05; 0,003$.

Например, очевидной является положительная корреляция между числом измерений в опыте и временем его проведения (рисунок 3.12), близкая к идеальной $R^2 = 1$, и наоборот (рисунок 3.13).

Корреляция является статической мерой оценки линейной зависимости между двумя переменными:

$$CORREL(x, y) = \frac{\sum (x - \langle x \rangle) (y - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum (x - \langle x \rangle)^2 \sum (y - \langle y \rangle)^2}}, \quad (3.9)$$

где $\langle x \rangle$, $\langle y \rangle$ – средние значения выборки.

В таблице 3.5 представлены данные для построения графиков, показанных на рисунках 3.12, 3.13.

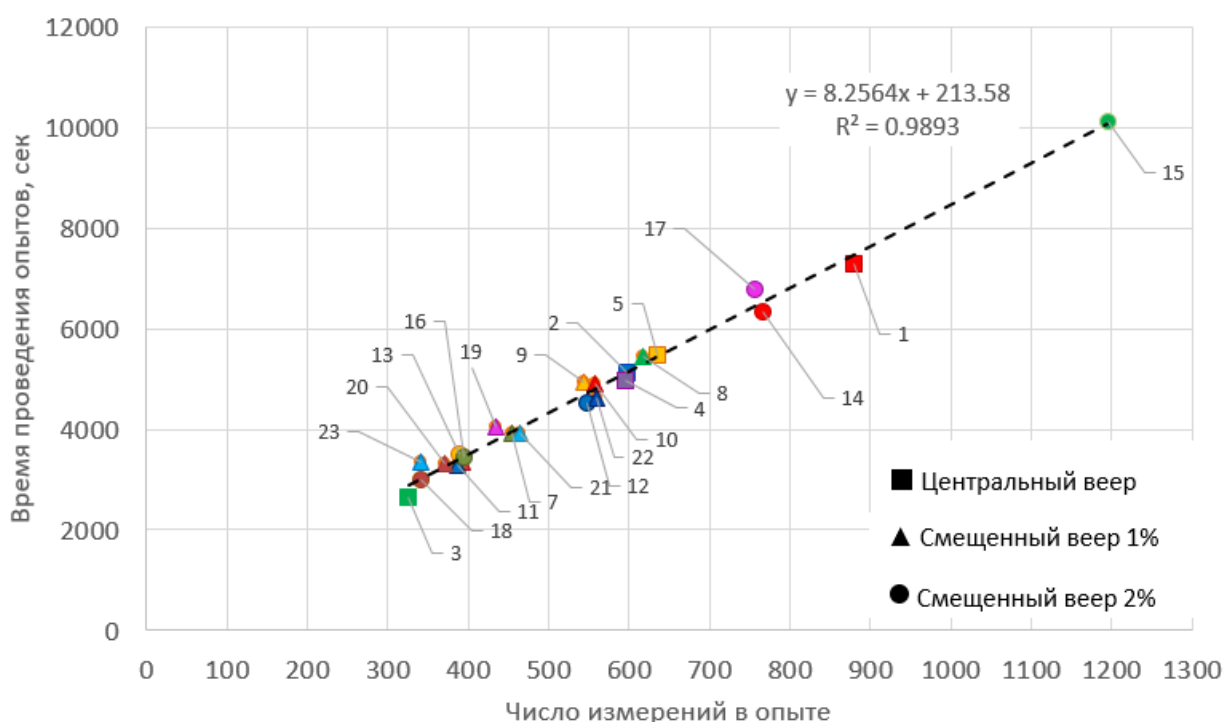


Рисунок 3.12 – Положительная корреляция

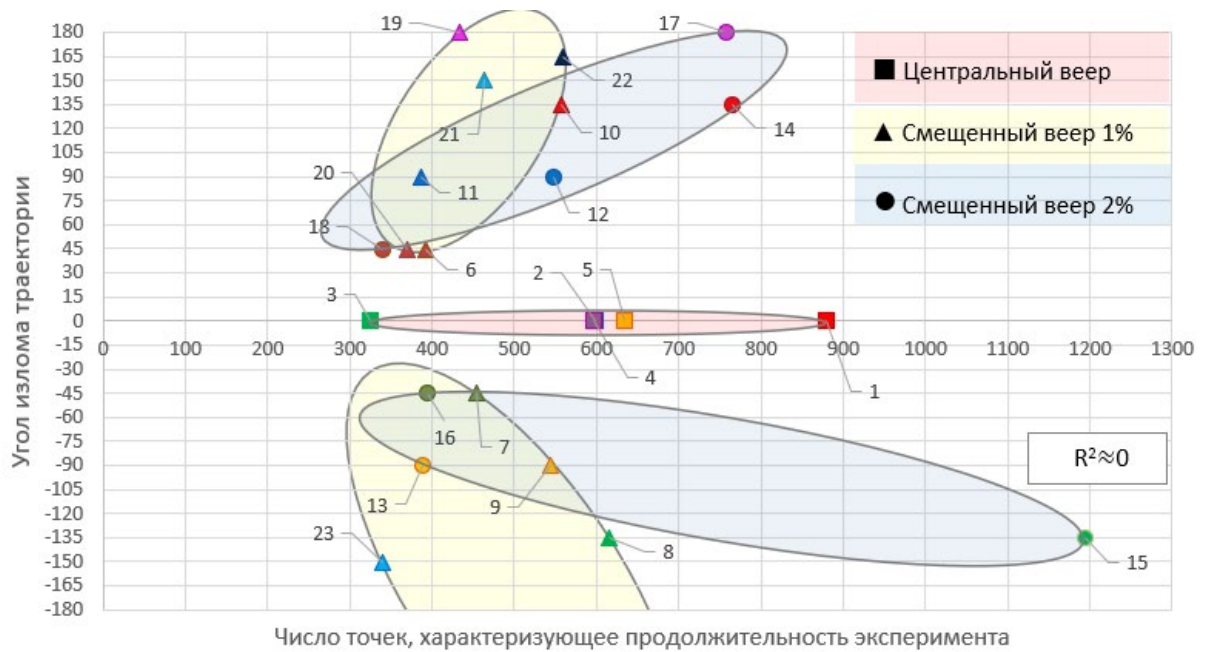


Рисунок 3.13 – Отсутствие корреляции

Таблица 3.5 – Данные о продолжительности эксперимента

№	Точек	Время, сек	Угол излома	Вид деформирования после излома
1	879	7298	0	—
2	598	5143	0	—
3	325	2637	0	—
4	596	4977	0	—
5	634	5489	0	—
6	393	3347	45	Растяжение
7	454	3917	–45	Кручение
8	616	5459	–135	Сжатие
9	544	4956	–90	Сжатие с кручением
10	558	4913	135	Реверсивное кручение
11	386	3296	90	Растяжение с реверсивным кручением
12	547	4513	90	Растяжение с реверсивным кручением
13	388	3508	–90	Сжатие с кручением
14	765	6334	135	Реверсивное кручение

№	Точек	Время, сек	Угол излома	Вид деформирования после излома
15	1195	10128	–135	Сжатие
16	395	3451	–45	Кручение
17	757	6800	180	Простая разгрузка
18	340	3011	45	Растяжение
19	434	4052	180	Простая разгрузка
20	370	3314	45	Растяжение
21	464	3918	150	Сжатие с реверсивным кручением
22	559	4620	165	Сжатие с реверсивным кручением
23	340	3342	–150	Сжатие с реверсивным кручением

Процесс считывания и записи измерений был полностью автоматизирован, что исключало влияние человеческого фактора (промахи) на данном этапе. Рассмотрим процесс оценки надежности математического ожидания измерения величины толщины стенки образцов. Величина точности интервальной оценки δ может быть найдена по формуле

$$\delta = \frac{S_h}{\sqrt{n}} \cdot t_{\alpha, f}, \quad (3.10)$$

где S_h – среднеквадратичное отклонение случайной величины h в выборке объемом n :

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{n - 1}}; \quad (3.11)$$

t – критерий Стьюдента для уровня значимости α и числа степеней свободы f ;

$\bar{h}$ – среднее арифметическое значение.

Функция плотности вероятности:

$$W_h = f(x, \Delta x, \varsigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varsigma}} e^{-\left(\frac{\Delta x^2}{2\varsigma^2}\right)}. \quad (3.12)$$

На рисунке 3.14 приведены значения частоты распределения толщины стенки образцов h . Значения h распределены близко к нормальному закону (закон Гаусса). Принятая доверительная вероятность $p = 0,997$ соответствовала уровню значимости $\alpha = 0,003$, число степеней свободы определялось по формуле $f = n - 1$ [126].

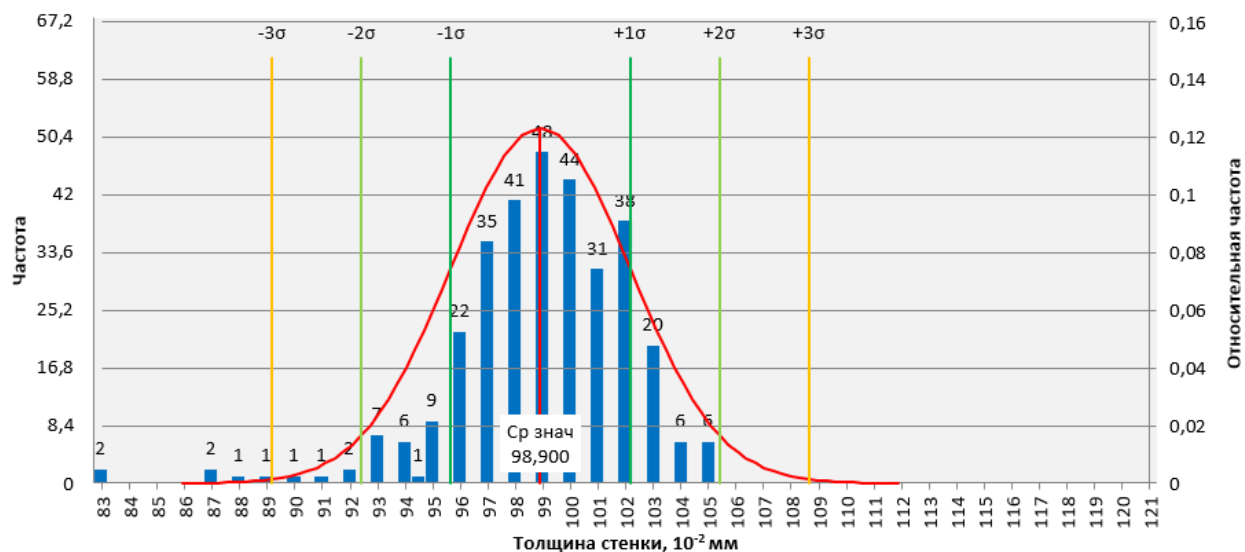


Рисунок 3.14 – Распределение измеряемой толщины стенки

В ходе эксперимента с регистрирующих устройств в память компьютера поступало множество данных. Полученные данные нуждались в предварительной подготовке, при необходимости очистке от шумов и выбросов, и преобразовании в удобный для анализа формат, например, в виде таблиц (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Исходные данные и сглаженные данные

t	t_0	t_1	t_2	$\dots$	t_{i-2}	t_{i-1}	t_i	t_{i+1}	t_{i+2}	$\dots$
x	x_0	x_1	x_2	$\dots$	x_{i-2}	x_{i-1}	x_i	x_{i+1}	x_{i+2}	$\dots$
y	y_0	y_1	y_2	$\dots$	y_{i-2}	y_{i-1}	y_i	y_{i+1}	y_{i+2}	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$\bar{x}$	$\bar{x}_0$	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\dots$	$\bar{x}_{i-2}$	$\bar{x}_{i-1}$	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_{i+1}$	$\bar{x}_{i+2}$	$\dots$
$\bar{y}$	$\bar{y}_0$	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\dots$	$\bar{y}_{i-2}$	$\bar{y}_{i-1}$	$\bar{y}_i$	$\bar{y}_{i+1}$	$\bar{y}_{i+2}$	$\dots$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$

Для упрощения визуального анализа, уменьшения шума, выявления трендов и подготовки к моделированию эти данные подвергались локальному сглаживанию по методу наименьших квадратов для получения сглаженных значений $\bar{y}_i$ [43]. Для аппроксимирующего многочлена третьей степени формулы сглаживания имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_{i-2} = \frac{1}{70} \cdot [69 \cdot y_{i-2} + 4 \cdot y_{i-1} - 6 \cdot y_i + 4 \cdot y_{i+1} - y_{i+2}] \\ \bar{y}_{i-1} = \frac{1}{35} \cdot [2 \cdot y_{i-2} + 27 \cdot y_{i-1} + 12 \cdot y_i - 8 \cdot y_{i+1} + 2 \cdot y_{i+2}] \\ \bar{y}_i = \frac{1}{35} \cdot [-3 \cdot y_{i-2} + 12 \cdot y_{i-1} + 17 \cdot y_i + 12 \cdot y_{i+1} - 3 \cdot y_{i+2}] \\ \bar{y}_{i+1} = \frac{1}{35} \cdot [2 \cdot y_{i-2} - 8 \cdot y_{i-1} + 12 \cdot y_i + 27 \cdot y_{i+1} + 2 \cdot y_{i+2}] \\ \bar{y}_{i+2} = \frac{1}{70} \cdot [-y_{i-2} + 4 \cdot y_{i-1} - 6 \cdot y_i + 4 \cdot y_{i+1} + 69 \cdot y_{i+2}] \end{array} \right. \quad (3.13)$$

Результаты сглаживания представлены на рисунке 3.15, величина погрешности не превышает 2,5 %.

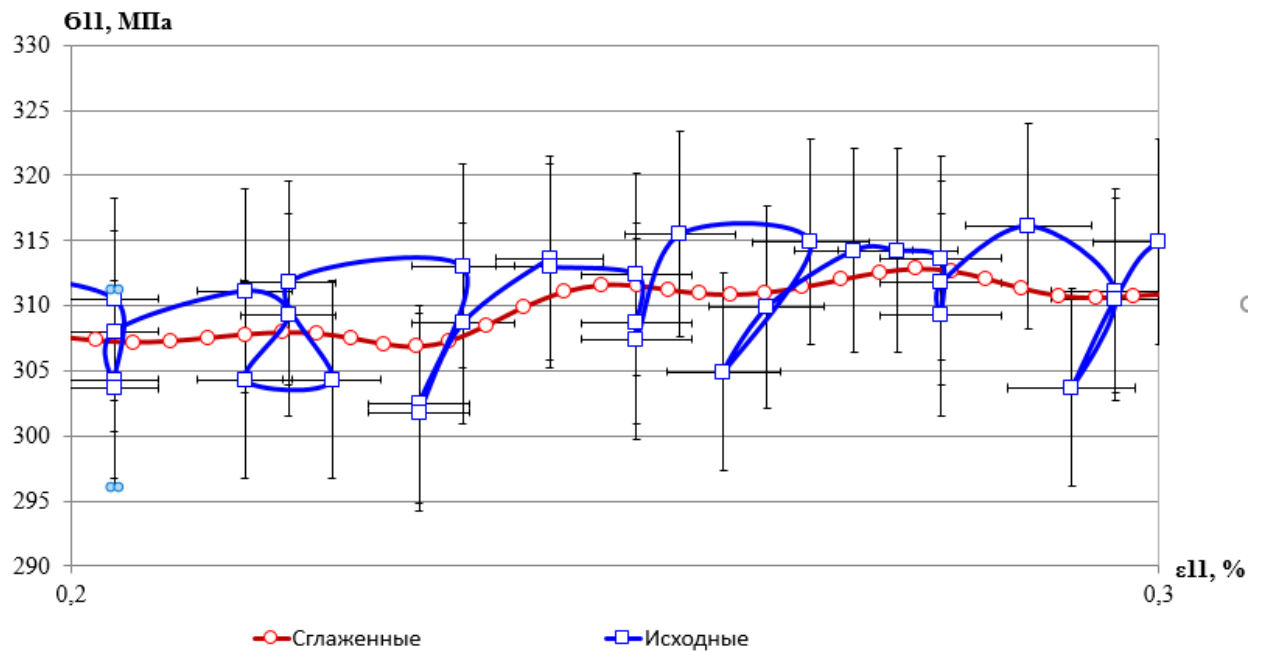


Рисунок 3.15 – Пример сглаживания данных

Таким образом, в данной главе разработана надежная и воспроизводима методика проведения экспериментов на сложное нагружение тонкостенных цилиндрических оболочек. Особое внимание было уделено описанию автоматизированной установки и образцам для испытаний, а также сглаживанию экспериментальных данных. Ввиду описанных выше ограничений количества опытов была тщательно спланирована программа экспериментов. Важным аспектом подкрепления исследования стала верификация данных.

В следующих главах представлены экспериментальные результаты, описана компьютерная программа для обработки и расчета, приведены определяющие соотношения и аппроксимирующие функции пластичности для различных по сложности траекторий, выполнено определение следа запаздывания скалярных и векторных свойств.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

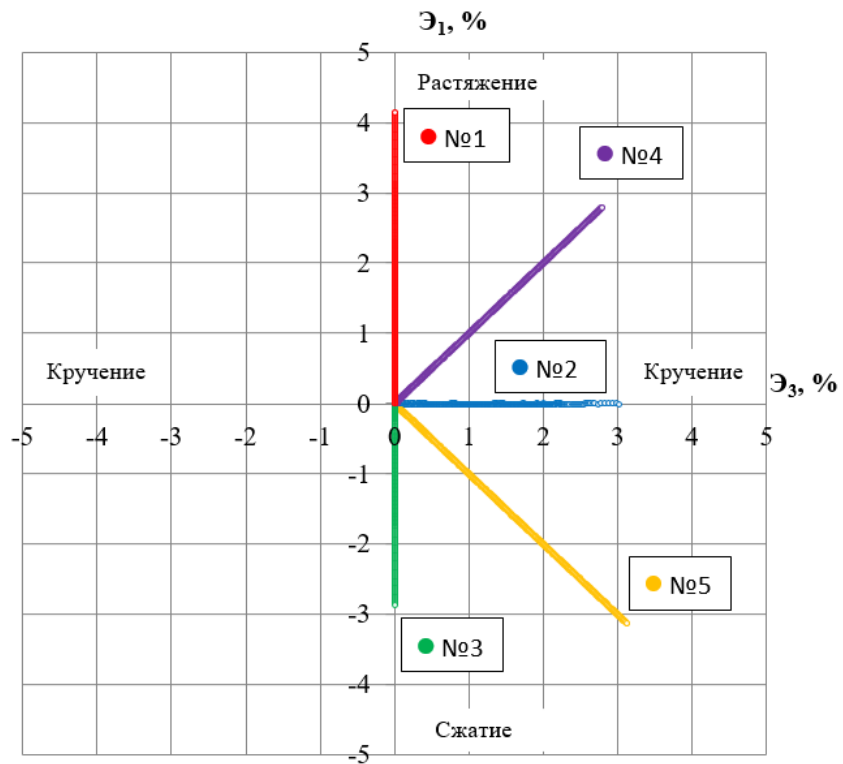
4.1. Проверка начальной изотропии материала

Перед выполнением основных программ по исследованию закономерностей упругопластического поведения материалов при сложном деформировании производится проверка начальной изотропии материала образцов. Она заключается в проведении базовых экспериментов и сопоставлении диаграмм деформирования при простых процессах нагружения: растяжении, сжатии, кручении, внутреннем давлении и пропорциональных процессах нагружения. Если для данных траекторий разброс по напряжениям (различие величин модуля вектора напряжений) не превышает 5–10 % (на уровне значения модуля вектора деформаций порядка $\varepsilon \approx 2\%$), полагаем, что материал образцов является квазиизотропным. Это позволяет использовать в расчетах процессов сложного нагружения и деформирования материалов общие определяющие соотношения теории упругопластических процессов.

Были проведены следующие простые нагружения: образец 1 подвергался растяжению, образец 2 – кручению, образец 3 – сжатию, образец 4 – пропорциональному растяжению с кручением, образец 5 – пропорциональному сжатию с кручением. Для каждого нагружения использовался свой образец [23]. Программа испытаний реализовывалась в векторном подпространстве деформаций $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ (рисунок 4.1а). Соответствующий ей отклик приведен в векторном подпространстве девиатора напряжений $S_1 - S_3$ (рисунок 4.1б).

Испытания по типу центрального веера являются базовыми и выполняются для каждой партии образцов с целью определения степени начальной изотропии исследуемого материала.

а



б

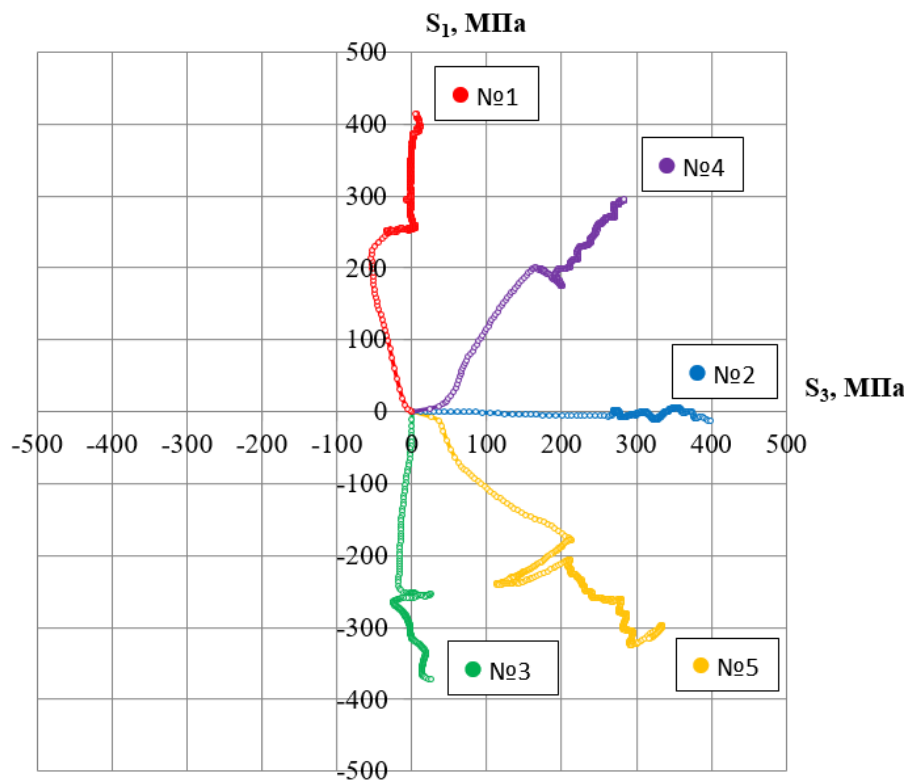


Рисунок 4.1 – Центральный веер. Программа (а); отклик на программу (б):
 образец № 1 – растяжение, образец № 2 – кручение, образец № 3 – сжатие,
 образец № 4 – пропорциональное растяжение с кручением,
 образец № 5 – пропорциональное сжатие с кручением

По результатам испытаний выполняли построение диаграмм деформирования и оценивали точность выполнения постулата изотропии при простых нагружениях [43]. На рисунке 4.2 представлены диаграммы прослеживания процесса деформирования, на рисунке 4.3 – графики зависимости $\sigma - \varepsilon$ для центрального веера.

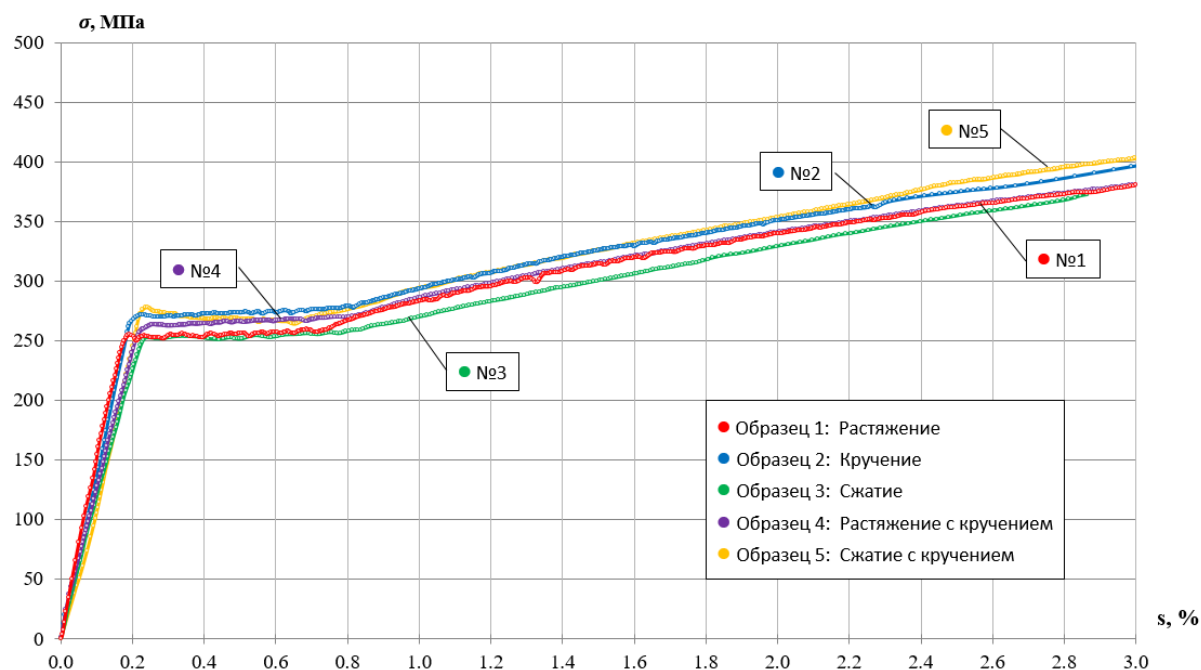


Рисунок 4.2 – Диаграммы прослеживания процесса $\sigma - s$

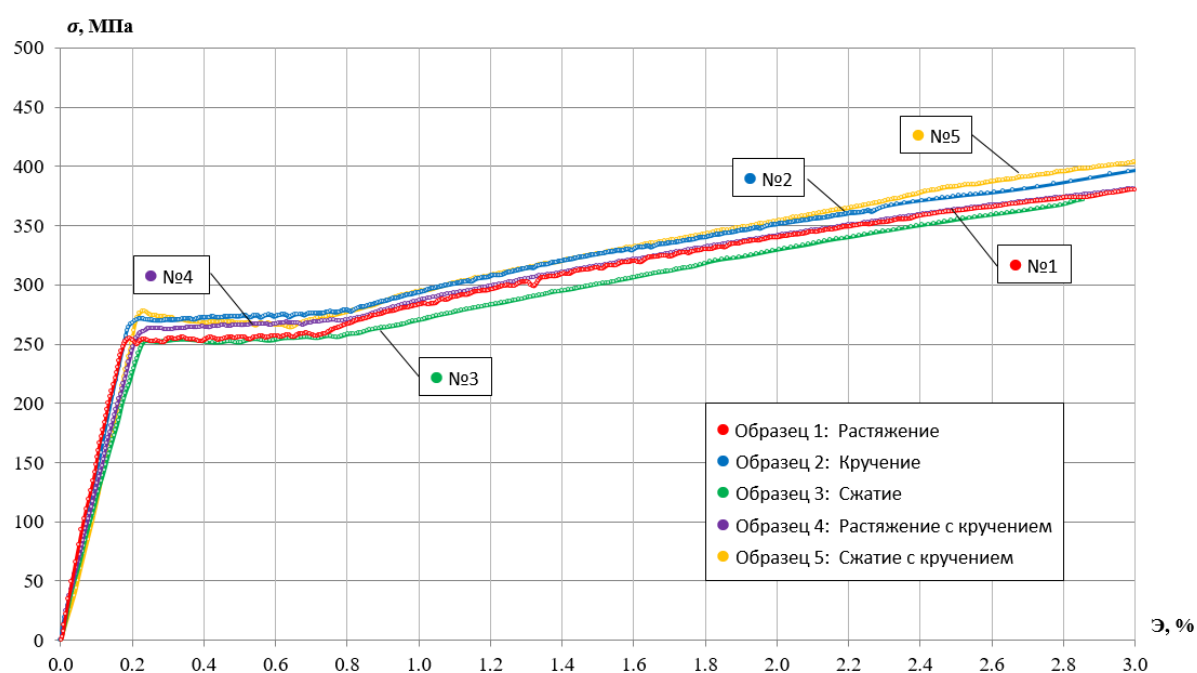


Рисунок 4.3 – Диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$

Для статистической обработки данных были отобраны значения модуля вектора напряжений σ с шагом $s \approx \Sigma \approx 0,05$. Для оценки надежности математического ожидания модуля вектора напряжений σ рассчитывалась величина δ_{AV} (точность интервальной оценки). Доверительная вероятность принята $P = 95 \%$, число степеней свободы $f = 4$. На рисунке 4.4 приведено сравнение диаграмм $\sigma - s$ и $\sigma - \Sigma$, образующих единую диаграмму деформирования.

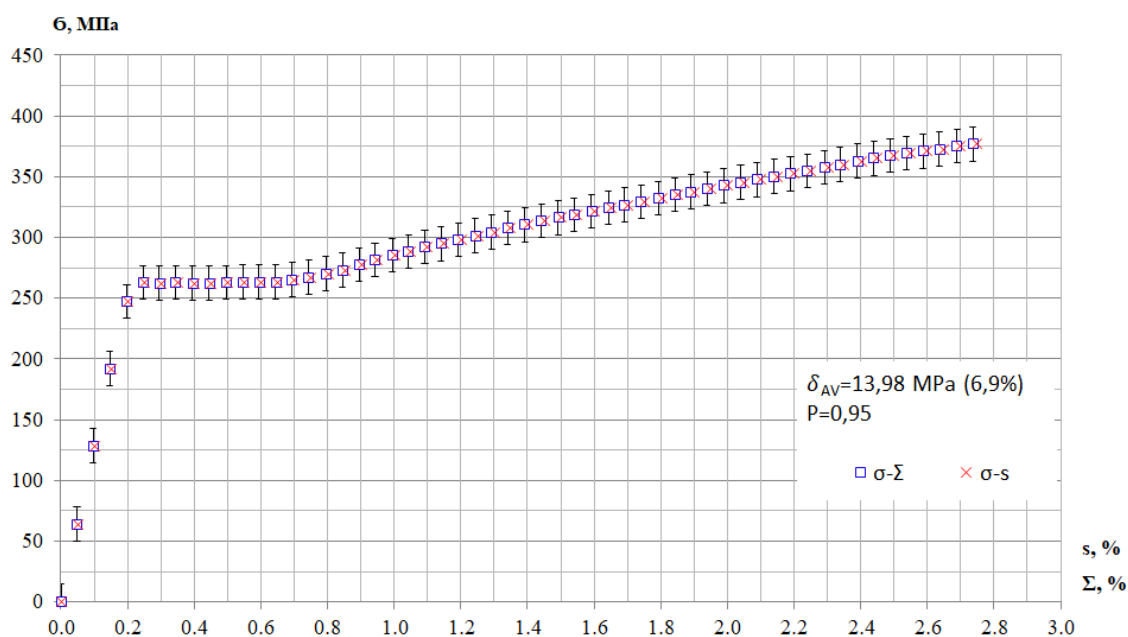
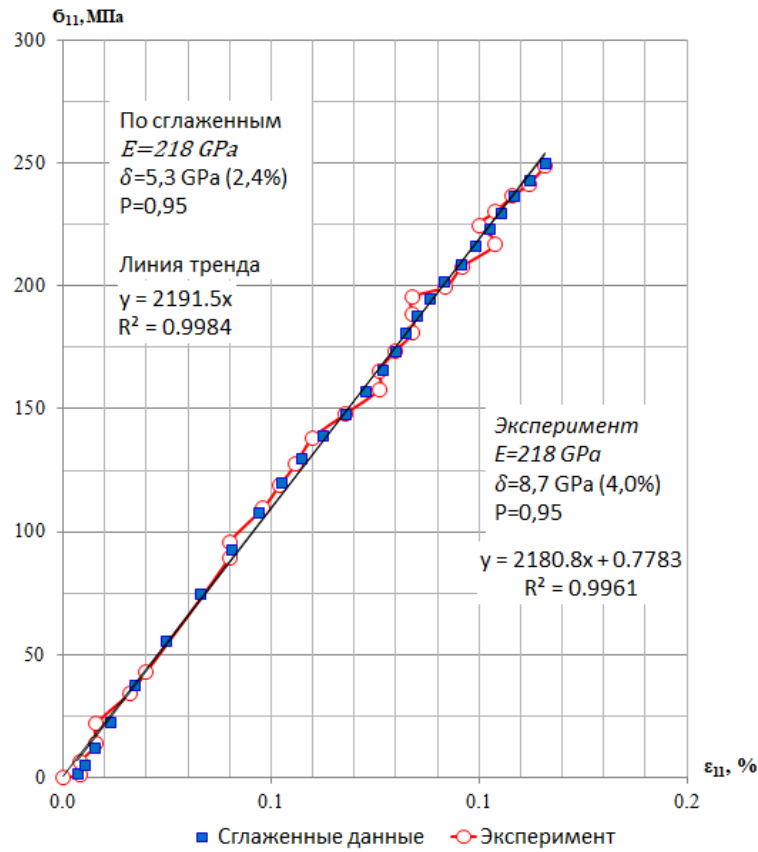
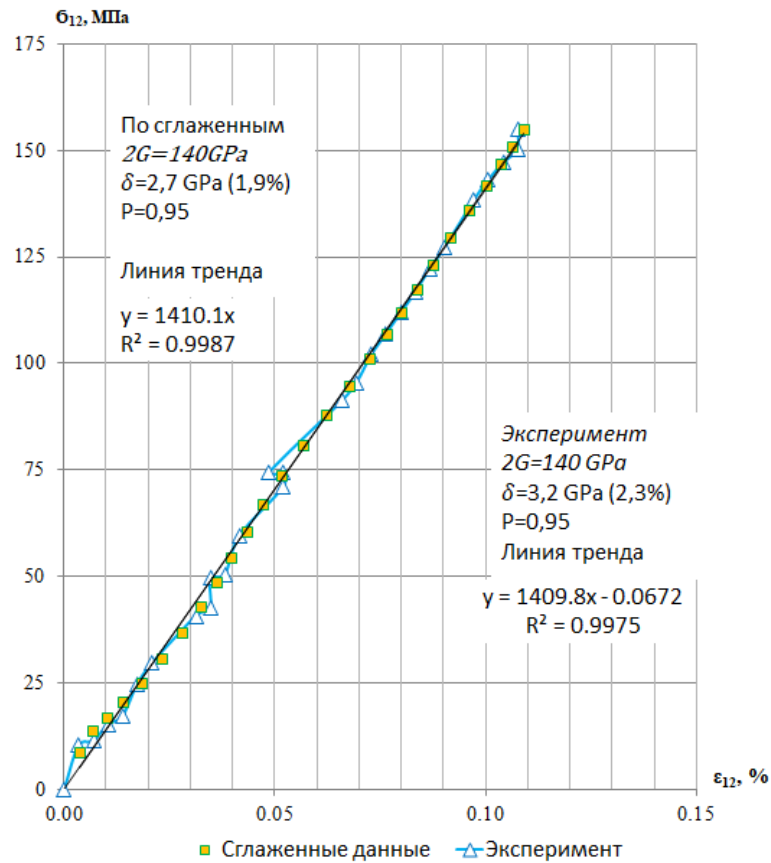


Рисунок 4.4 – Сравнение диаграмм $\sigma - s$ и $\sigma - \Sigma$

Из диаграмм растяжения и кручения были найдены модуль упругости $E = (2,18 \pm 0,03) \cdot 10^5$ МПа (рисунок 4.5); удвоенный модуль сдвига $2G = (1,41 \pm 0,03) \cdot 10^5$ МПа (рисунок 4.6); коэффициент Пуассона $\mu = (0,28 \pm \pm 0,045)$. С появлением пластических деформаций коэффициент μ быстро возрастал и приближался к значению $\mu_p = 0,5$, что позволяло в расчетах при обработке экспериментальных данных использовать условие несжимаемости материала (рисунок 4.7).

$$K = E/[3(1 - 2\mu)],$$

$$G = \frac{E}{[2(1 + 2\mu)]} \rightarrow \mu = \frac{E}{4G} - 0,5$$

Рисунок 4.5 – Определение модуля упругости E Рисунок 4.6 – Определение удвоенного модуля сдвига $2G$

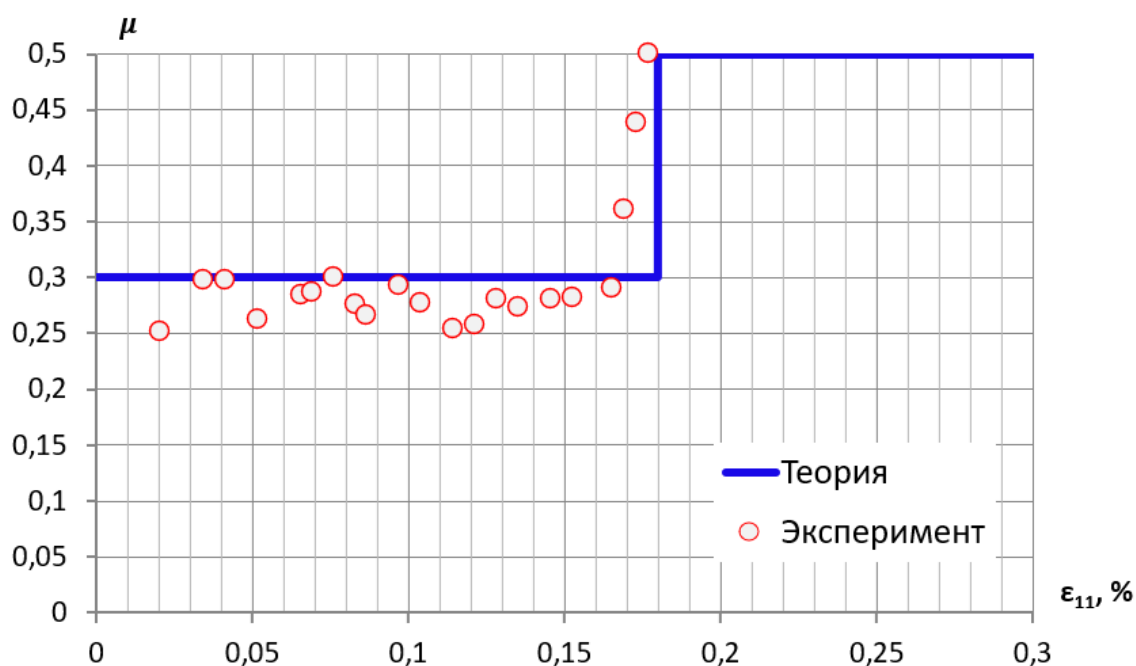


Рисунок 4.7 – Определение коэффициента Пуассона μ

Результаты испытания по типу центрального веера для данной серии образцов подтвердили начальную изотропию материала. Таким образом было установлено, что постулат изотропии при простых нагружениях выполняется и позволяет в дальнейшем использовать единую диаграмму упрочнения материала $\sigma = \Phi(s)$ [43].

4.2. Эксперименты по типу пропорционально смещённого на 1% веера

Второй частью серии экспериментов, посвященных изучению смещённых вееров, стали двухзвенные ломаные траектории с изломом при достижении $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1\%$ [24]. Цель данных опытов заключалась в выявлении закономерностей в напряженно-деформированном состоянии оболочек в зависимости от угла, под которым происходит излом траектории, а также в исследовании глубины, достигаемой «нырком», когда материал частично разгружается при начальном деформировании $\epsilon = s = \sqrt{2}\% \approx 1,41\%$.

Для реализации программы испытаний была выбрана плоскость $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ в векторном пространстве деформаций (рисунок 4.8). Программа представляла собой пропорционально смещённый веер из двухзвенных ломаных траекторий. В данной серии испытаний было использовано 8 образцов, прошедших проверку геометрических параметров (толщины стенки, радиуса срединной поверхности, параллельности, биения и т. д.). Излом каждой траектории осуществлялся при $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3 = 1\%$, значения углов излома представлены таблице 4.1.

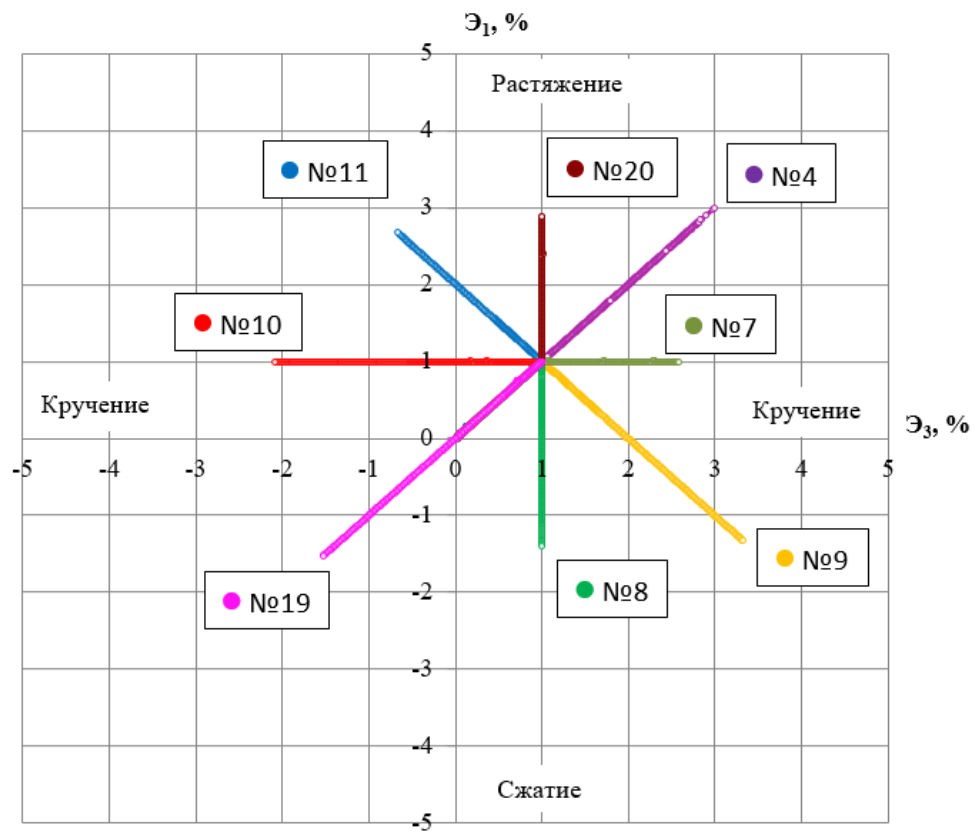


Рисунок 4.8 – Программы испытания оболочек с изломом при $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3 = 1\%$

Таблица 4.1 – Параметры эксперимента

Номер образца	Угол излома траектории, град.	Вид нагружения после излома
4	0	Растяжение с кручением
20	45	Растяжение
7	-45	Кручение
11	90	Растяжение с реверсивным кручением
9	-90	Сжатие с кручением

10	135	Реверсивное кручение
8	-135	Сжатие
19	180	Простая разгрузка

Отклик на реализуемую программу в плоскости $S_1 - S_3$, соответствующий программе, реализовывался в векторном пространстве девиатора напряжений (рисунок 4.9). По результатам обработки полученных опытных данных были построены диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 4.10а) и $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 4.11а). В опытах обнаруживалось проявление ε_2 -эффекта, когда компонента ε_2 имела отличное от нуля значение. Другими словами, исследованные траектории деформирования не лежали в рассматриваемой плоскости, однако, поскольку значение ε_2 незначительное, в расчетах оно не использовалось.

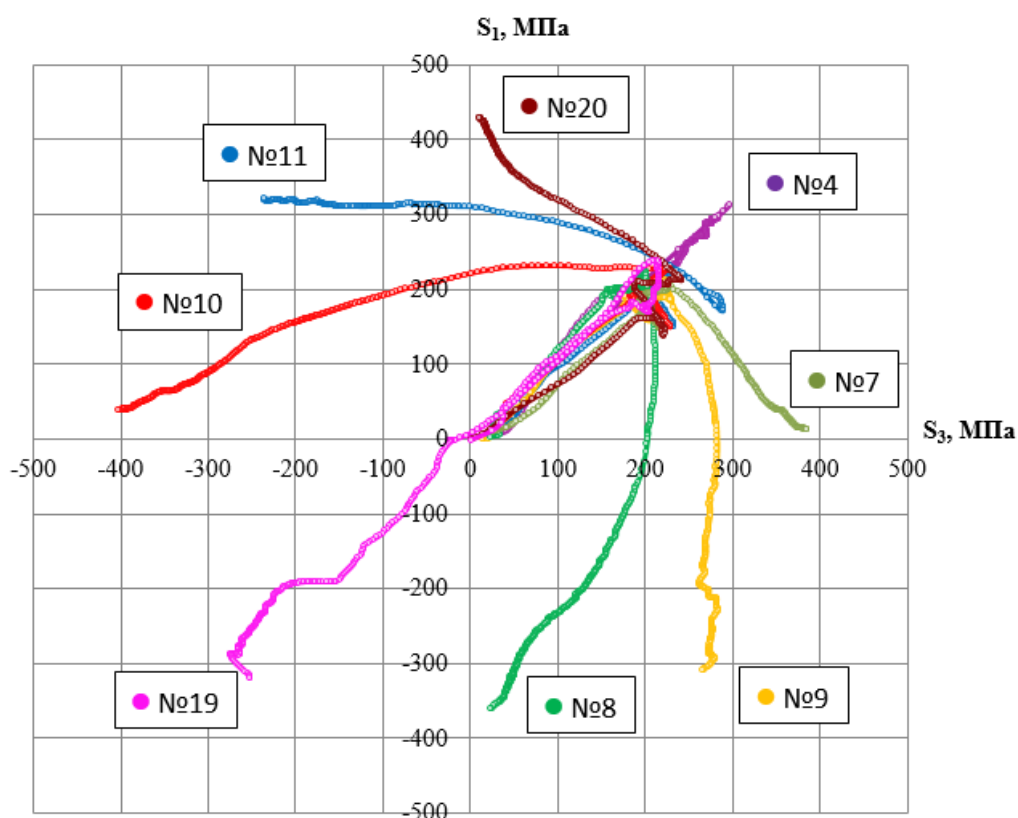


Рисунок 4.9 – Отклик на программы испытаний

Как и ожидалось, после излома траектории, в точке K ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 1\%$), на диаграмме образуются «нырки» модуля вектора напряжений, глубина

которых тем больше, чем больше угол излома траектории деформирования в точке K [43]. Экспериментальная кривая $\sigma = \sigma(s)$ проходит ниже универсальной кривой $\sigma = \Phi(s)$, при этом примерно оставаясь параллельной ей. Отклонение диаграмм от единой кривой показано коридором $\delta = 10\%$ (рисунок 4.10б).

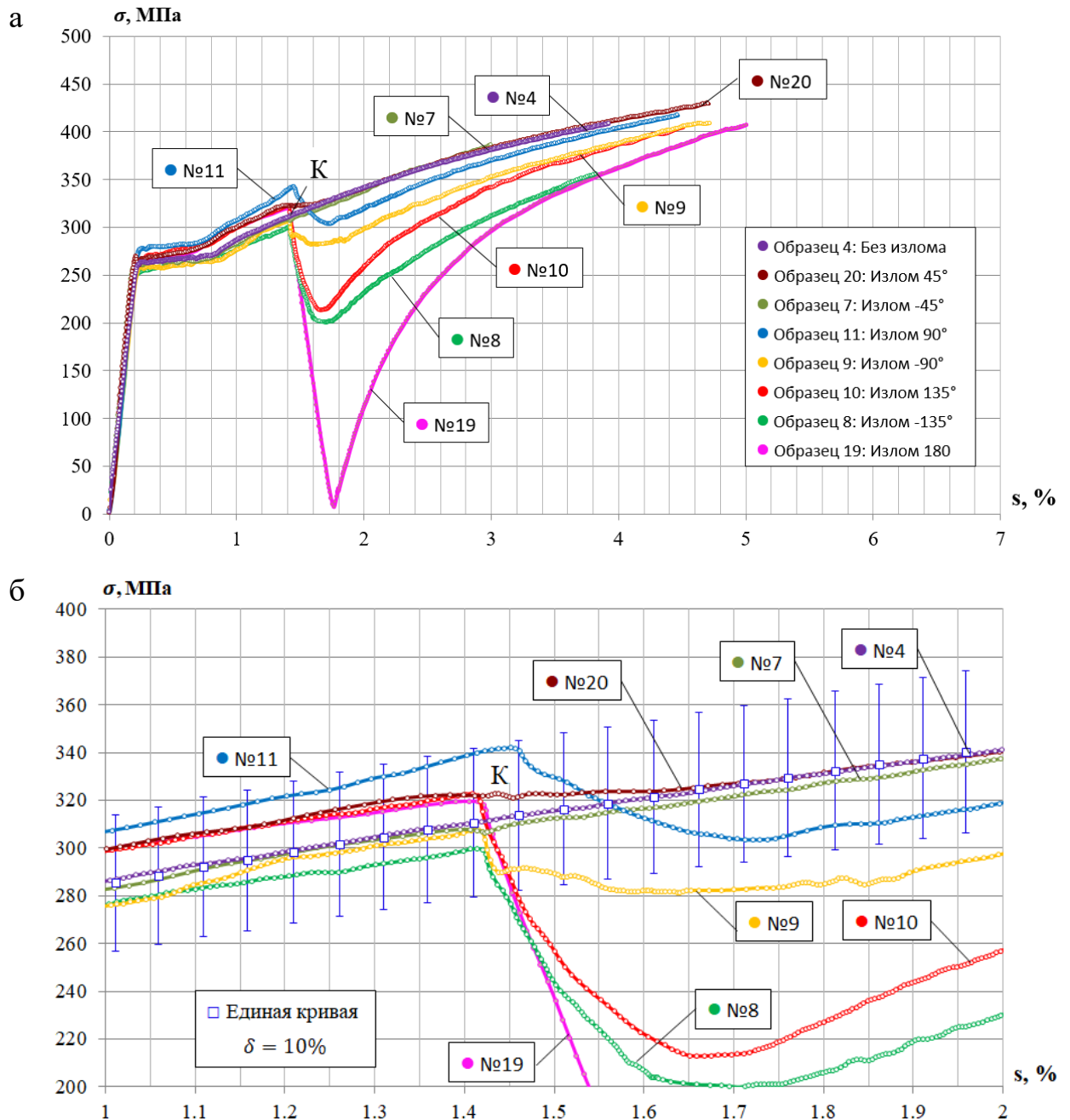


Рисунок 4.10 – Диаграммы $\sigma - s$: общий вид (а);
погрешность вблизи точки излома (б)

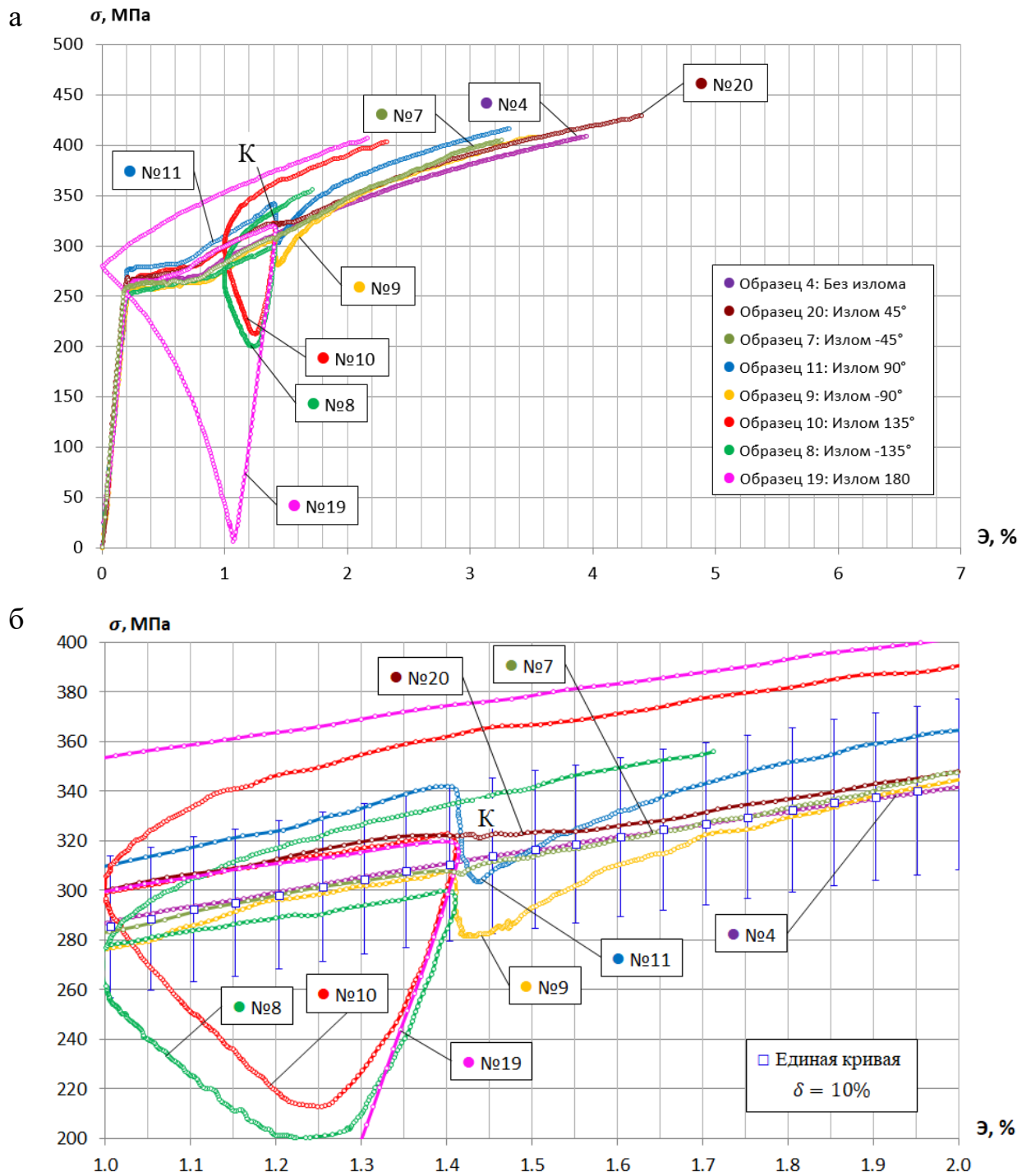


Рисунок 4.11 – Диаграммы $\sigma - \varepsilon$: общий вид (а);
погрешность вблизи точки излома (б)

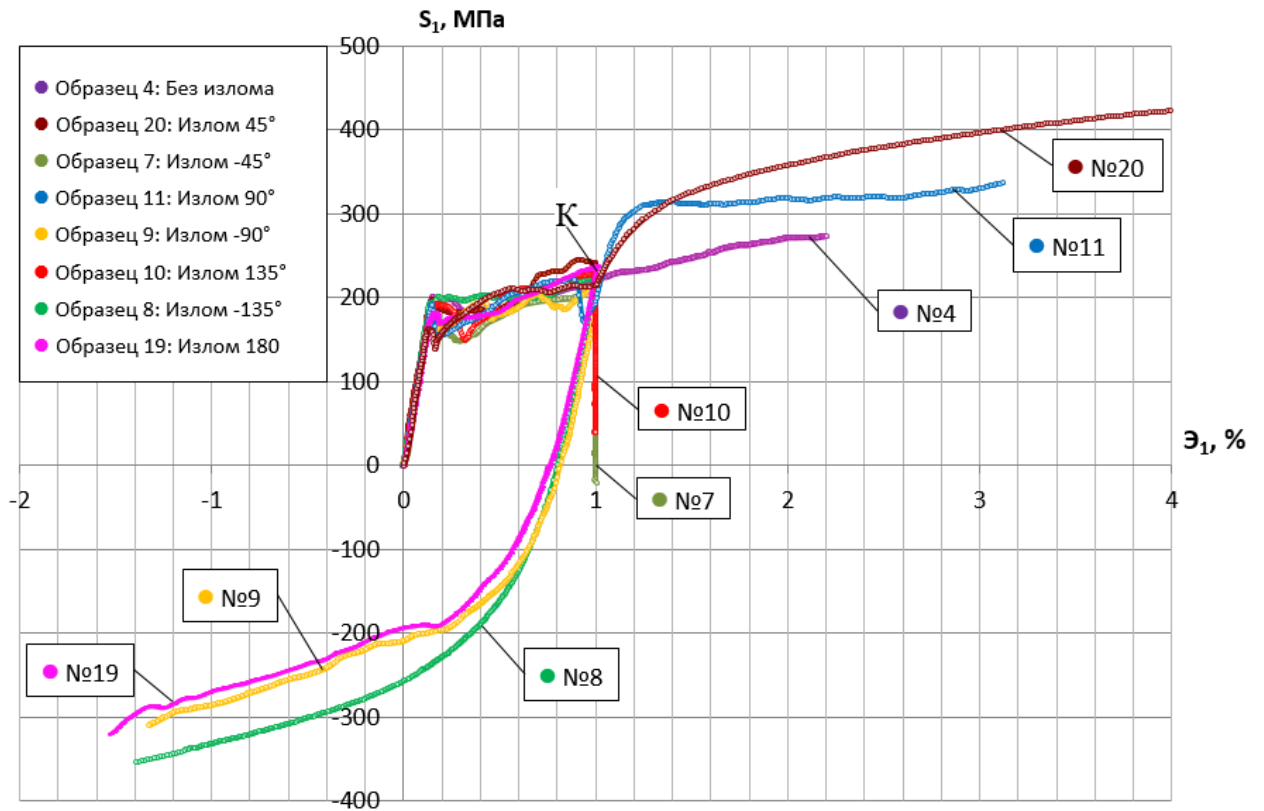
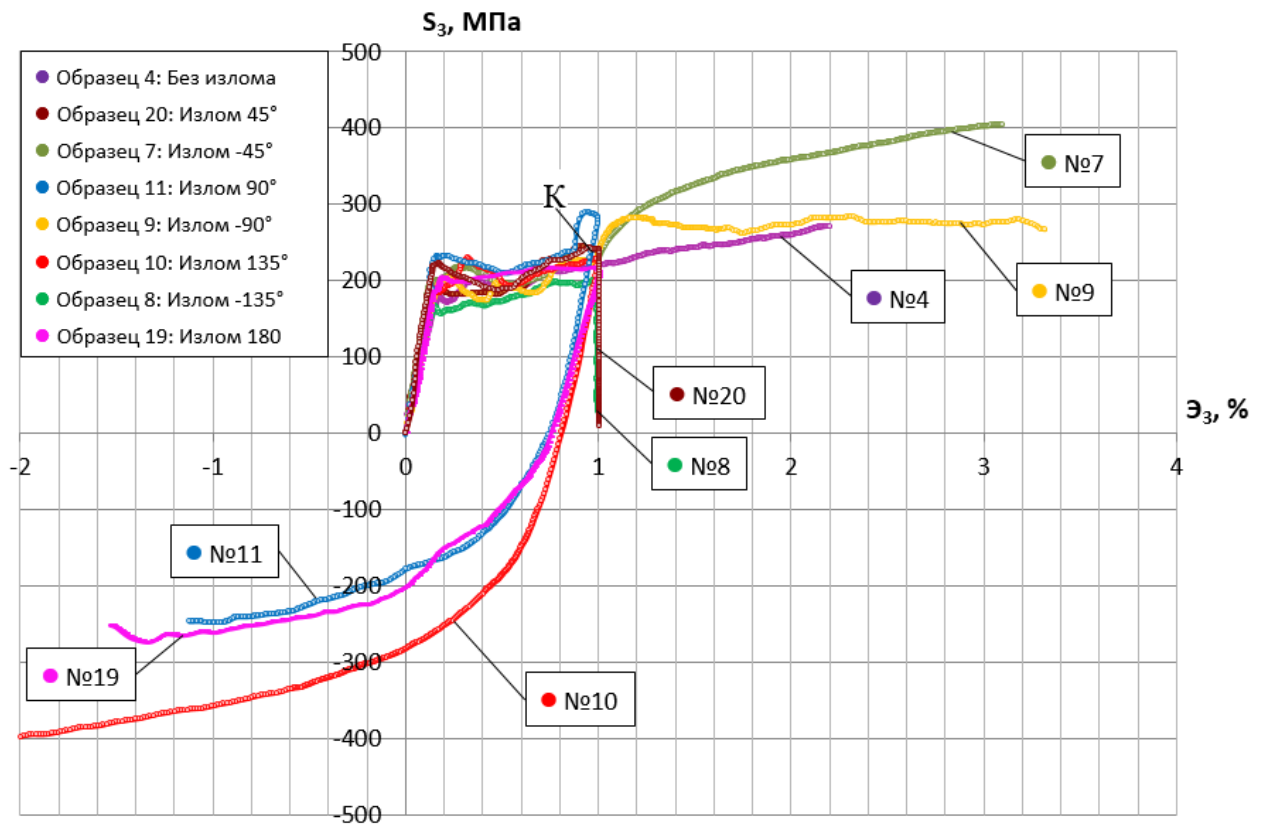
На диаграмме $\sigma - \varepsilon$ хорошо видно запаздывание скалярных свойств с явной тенденцией к выходу кривой $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ на значения выше универсальной

кривой нагружения $\sigma = \Phi(\varepsilon)$. Это свидетельствует об упрочнении материала, тем больше, чем больше угол излома траектории. Запаздывание проявляется при углах излома траектории деформирования, превышающих 90° . При углах до 90° включительно наблюдается «нырок» с последующим выходом на универсальную кривую.

Диаграммы $\sigma - s$ и $\sigma - \varepsilon$ при зеркальном отражении траекторий деформирования имеют практически одинаковый вид, отклонение не превышает 10 %. Наибольшее среднеквадратичное отклонение от единой кривой на участке до излома не превышает 10,4 МПа (3,6 %).

На рисунке 4.12 показаны локальные диаграммы деформирования в плоскости $S_1 - \varepsilon_1$, на рисунке 4.13 – в плоскости $S_3 - \varepsilon_3$. Они наглядно демонстрируют, что отражение траектории деформирования приводит к зеркальному отображению локальных диаграмм. Так при изломе траектории на угол 45° на диаграмме $S_1 - \varepsilon_1$ виден рост компоненты S_1 , а при изломе на угол -45° аналогичный рост наблюдается на диаграмме $S_3 - \varepsilon_3$ для компоненты S_3 . При простом нагружении (все образцы до точки излома и образец 4 на протяжении всего опыта) кривые имеют схожий вид в обеих плоскостях. Вид локальных кривых для угла излома 180° , соответствующего простой разгрузке, также сохраняется.

На ниспадающем участке «нырка» в плоскости $S_1 - \varepsilon_1$ происходит упругая разгрузка для образцов, подверженных сжатию и сжатию с кручением и упругое нагружение при растяжении, в том числе с реверсивным кручением. На диаграммах $S_3 - \varepsilon_3$ упругая разгрузка происходит при растяжении с реверсивным кручением. На восходящей ветви «нырка» упругая разгрузка по растяжению-сжатию продолжается, но происходит активное пластическое деформирование от кручения, что и является причиной прекращения частичной упругой разгрузки материала.

Рисунок 4.12 – Локальные диаграммы $S_1 - \varepsilon_1$ Рисунок 4.13 – Локальные диаграммы $S_3 - \varepsilon_3$

На рисунке 4.14 приведены зависимости угла сближения ϑ_1 от длины дуги траектории Δs , для большей наглядности в качестве начала отсчета принята точка излома траектории деформирования. На первом участке при простом пропорциональном деформировании во всех опытах угол сближения, характеризующий векторные свойства материалов, имеет значения, близкие к нулю. После излома траектории деформирования наблюдается скачкообразное возрастание угла на величину, близкую к значению угла излома α_b , с последующим уменьшением по закону, близкому к экспоненциальному. Угол ϑ_1 для отраженных траекторий также совпадает с точностью до 5 %.

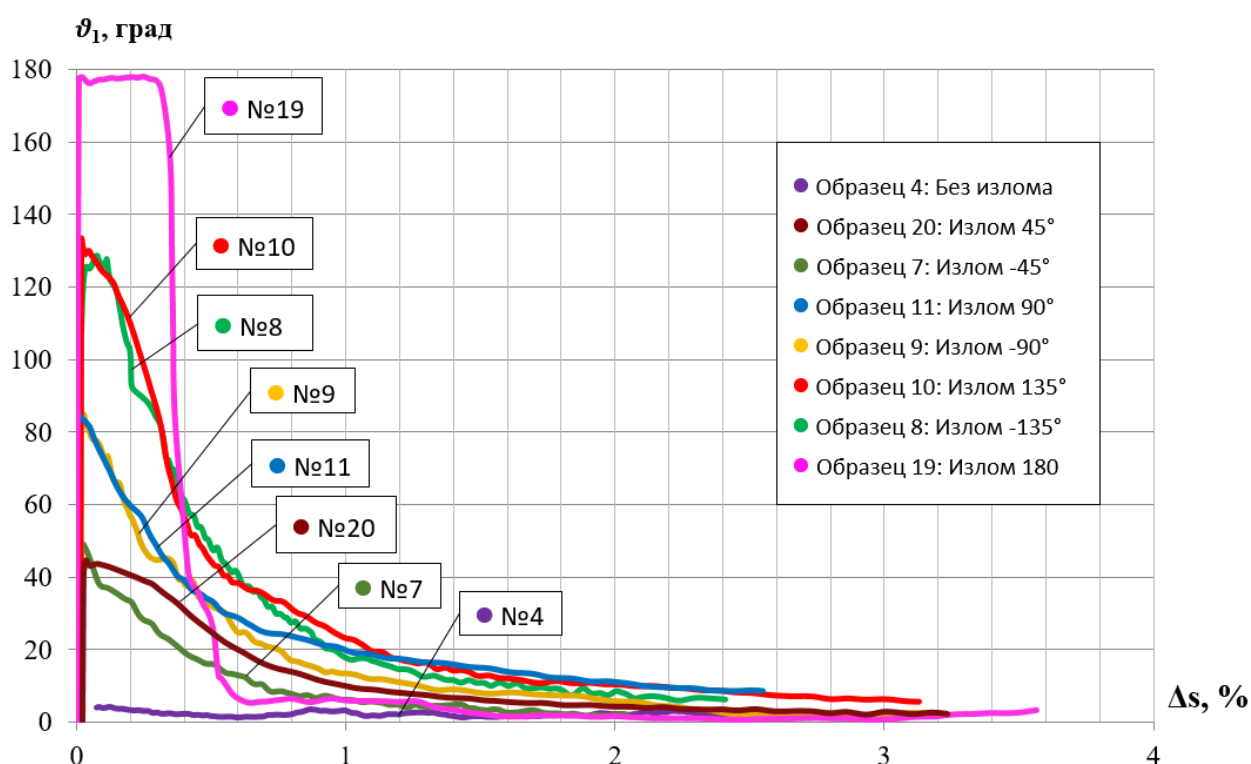


Рисунок 4.14 – Диаграмма угла сближения ϑ_1 — s

Таким образом, установлено, что при зеркальных изломах траектории деформирования векторные свойства и скалярные свойства материала «сталь 45» практически совпадают, а величина запаздывания зависит от угла излома траектории.

4.3. Эксперименты по типу пропорционально смещённого на 2 % веера

Третья часть экспериментальных исследований смещённых вееров – двухзвенные ломаные траектории с изломом при достижении $\Theta_1 = \Theta_3 = 2\%$. Цель данных опытов – изучение закономерностей напряженно-деформированного состояния оболочек, сравнение глубины «нырка», длины следов запаздывания, параметров пластичности при увеличении начального (предварительного) деформирования до значения $\Theta = s = \sqrt{8}\% = 2,83\%$.

В данной серии испытаний было использовано 8 образцов, прошедших проверку геометрических параметров (толщины стенки, радиуса срединной поверхности, параллельности, биения и т. д.) [140]. Данные о номерах образцов, углах излома траекторий и соответствующих им видах нагружения после излома траектории деформирования сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры эксперимента

№ образца	Угол излома траектории, град.	Вид нагружения после излома
4	0	Растяжение с кручением
12	90	Растяжение с реверсивным кручением
13	-90	Сжатие с кручением
14	135	Реверсивное кручение
15	-135	Сжатие
16	-45	Кручение
17	180	Простая разгрузка
18	45	Растяжение

Программы испытаний в плоскости $\Theta_1 - \Theta_3$ векторного пространства деформаций представлены на рисунке 4.15. Отклик на реализуемую программу в плоскости $S_1 - S_3$ векторного пространства девиатора напряжений показан на рисунке 4.16.

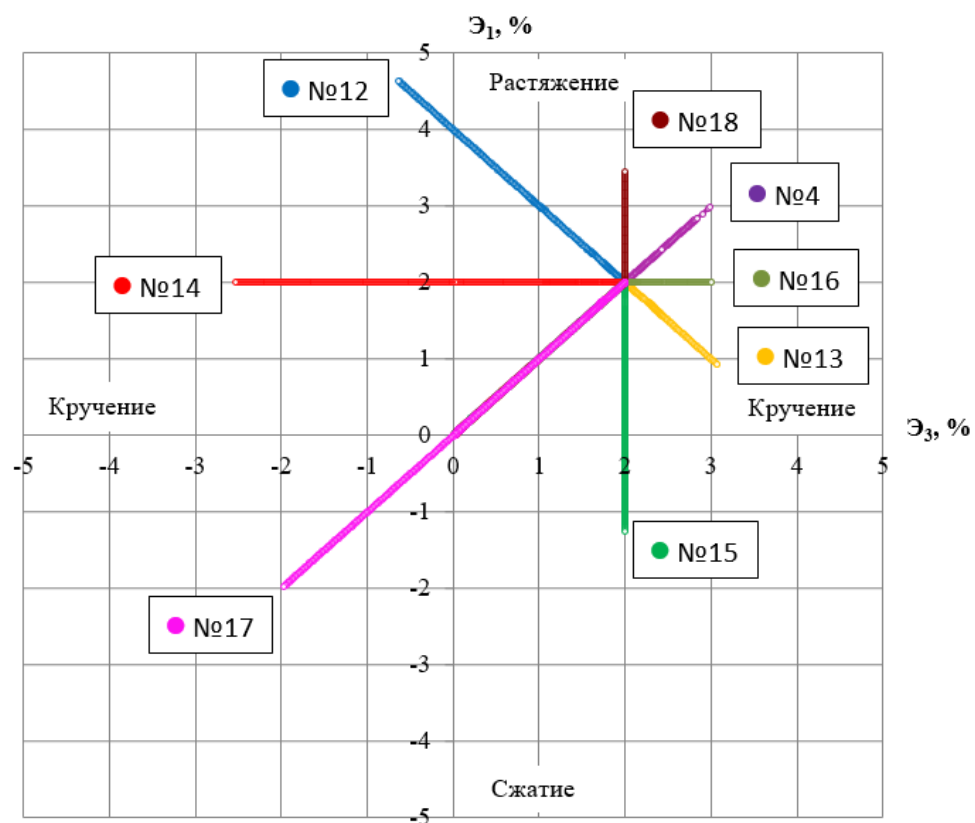


Рисунок 4.15 – Программы испытания оболочек с изломом при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2\%$

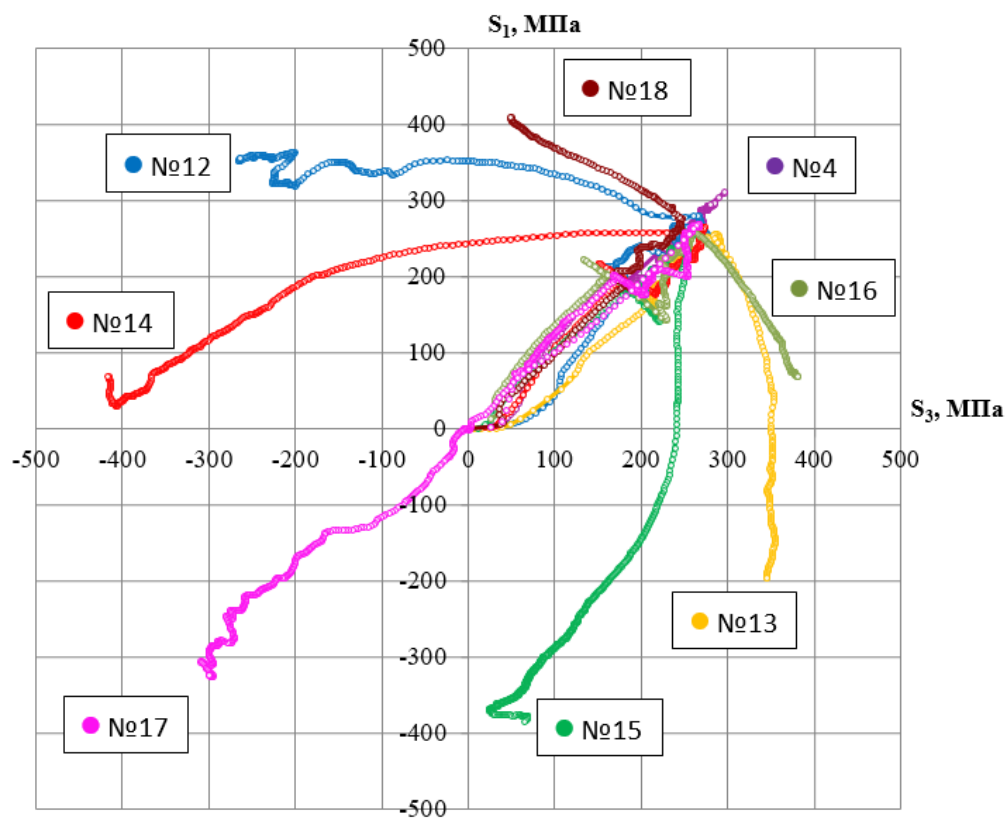
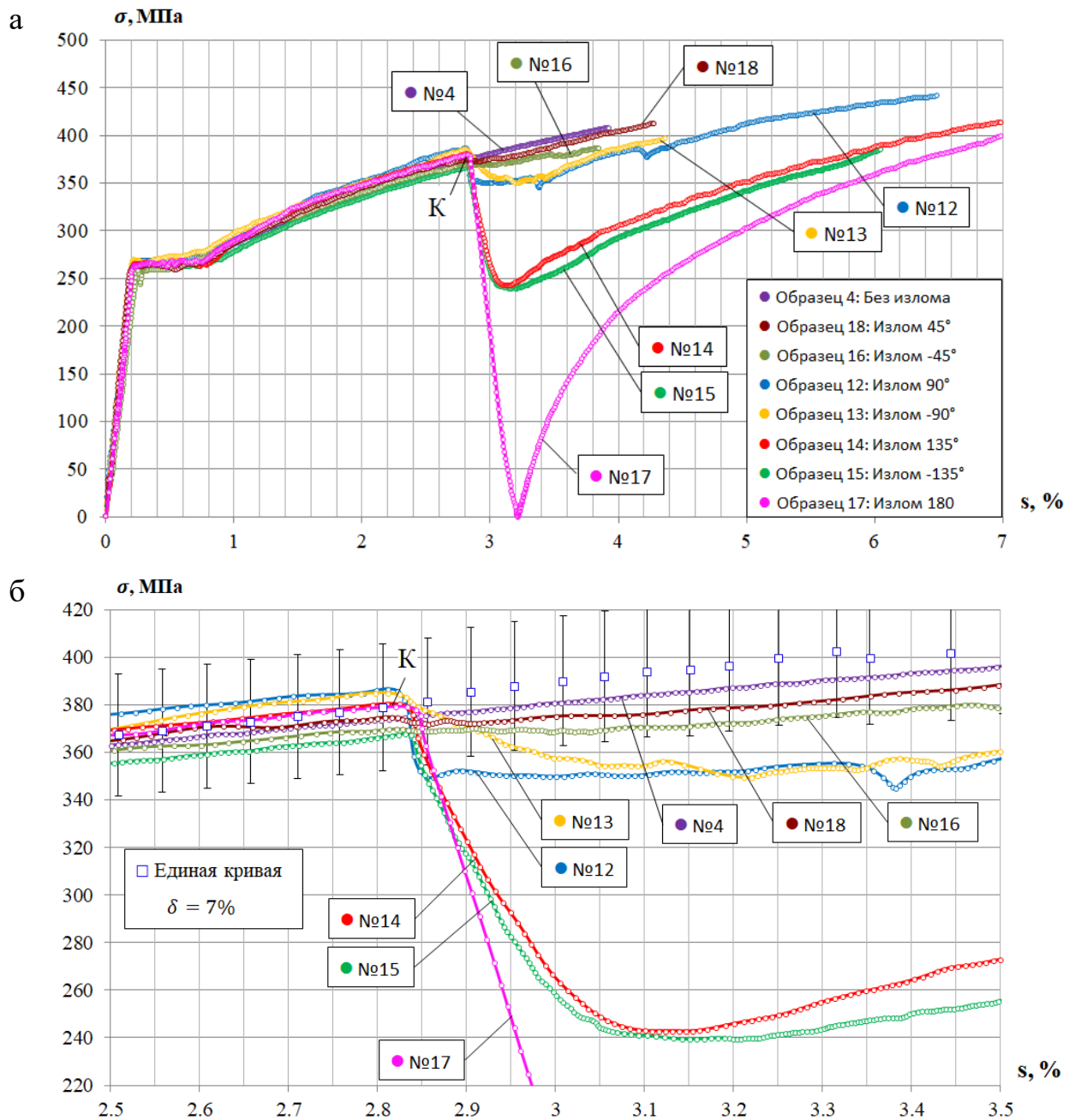


Рисунок 4.16 – Отклик на программы

По результатам обработки полученных опытных данных были построены диаграммы деформирования $\sigma - s$ (рисунок 4.17а) и $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 4.18а). На графиках фиксируется характерное падение модуля вектора напряжений после излома траектории в точке К, причём выраженность этого эффекта возрастает с увеличением угла излома траектории.



Экспериментальные кривые $\sigma = \sigma(s)$ проходят ниже единой кривой $\sigma = \Phi(s)$. Отклонение диаграмм от единой кривой показано коридором $\delta = 7\%$ (см. рисунок 4.176).

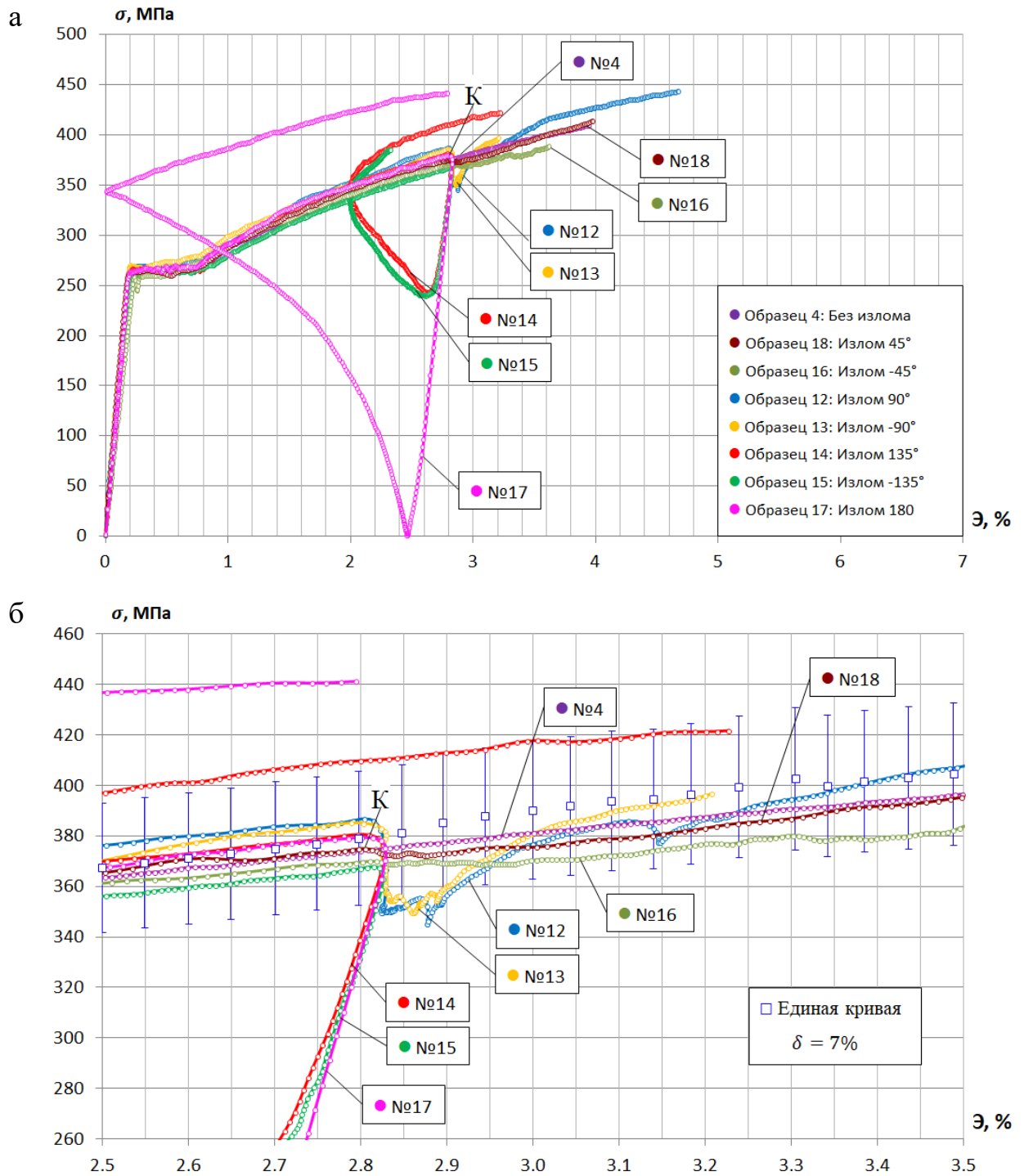


Рисунок 4.18 – Диаграммы $\sigma - \varepsilon$: общий вид (а);
погрешность вблизи точки излома (б)

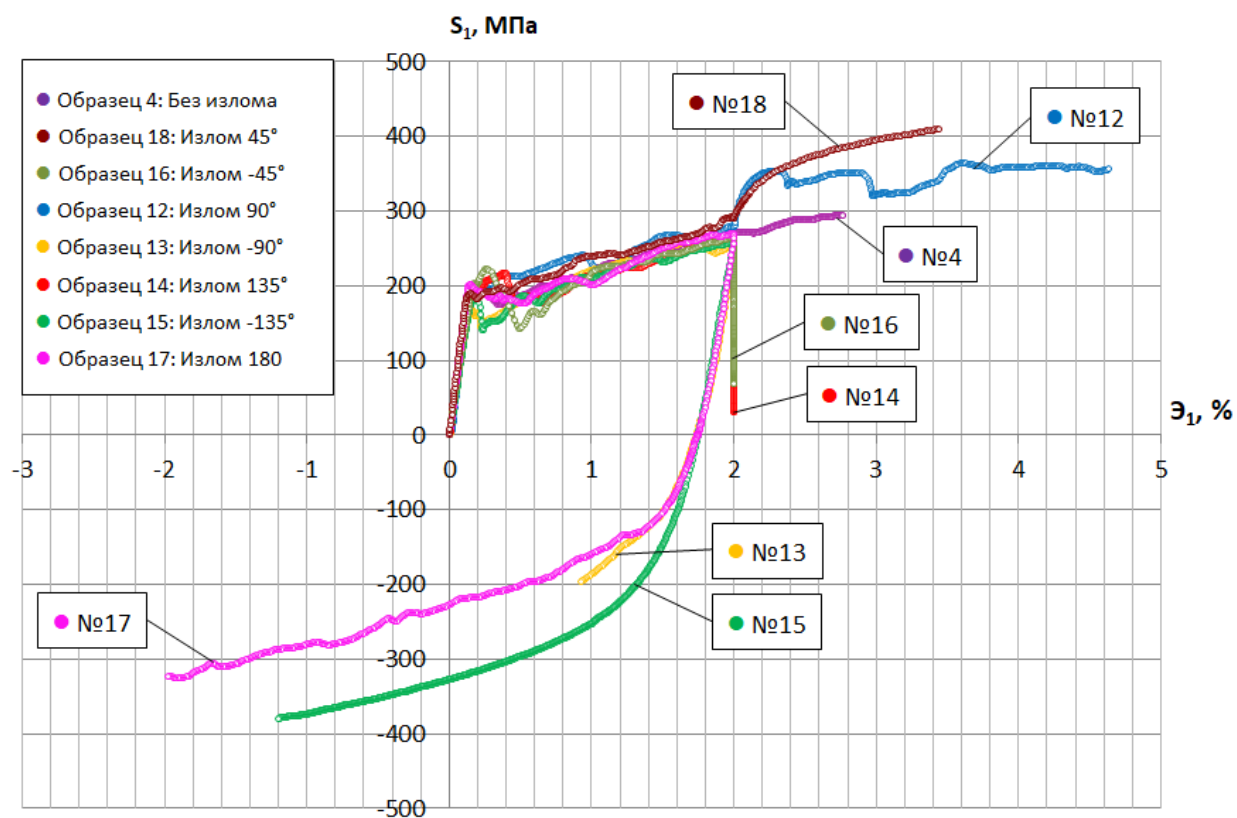
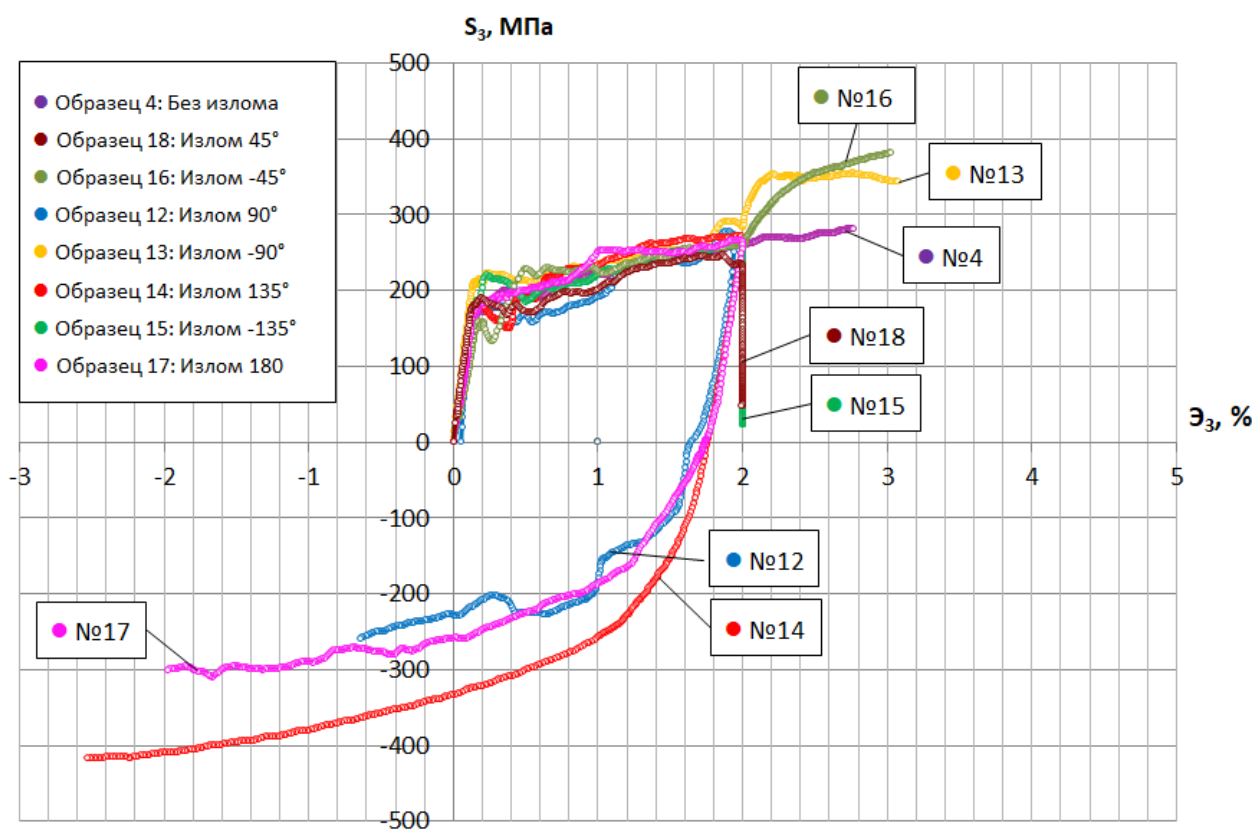
На диаграмме $\sigma - \Theta$ (см. рисунок 4.18) хорошо видно запаздывание скалярных свойств с явной тенденцией к выходу кривой $\sigma = \sigma(\Theta)$ на значения выше универсальной кривой нагружения $\sigma = \Phi(\Theta)$. Это свидетельствует об упрочнении материала, тем больше, чем больше угол излома траектории. Запаздывание проявляется при углах излома траектории деформирования, превышающих 90° . При углах до 90° включительно наблюдается «нырок» с последующим выходом на универсальную кривую.

Вид диаграмм $\sigma - s$ и $\sigma - \Theta$ при зеркальном отражении траекторий деформирования практически одинаковый, отклонение не превышает 5 %.

Наибольшее среднеквадратичное отклонение от единой кривой на участке от площадки текучести до излома не превышает 5,3 МПа (1,8 %).

На рисунке 4.19 показаны локальные диаграммы деформирования в плоскости $S_1 - \Theta_1$, на рисунке 4.20 – в плоскости $S_3 - \Theta_3$. Они наглядно демонстрируют, что отражение траектории деформирования приводит к зеркальному отображению локальных диаграмм. Так, при изломе траектории на угол 45° на диаграмме $S_1 - \Theta_1$ виден рост компоненты S_1 , а при изломе на угол -45° аналогичный рост наблюдается на диаграмме $S_3 - \Theta_3$ для компоненты S_3 . При простом нагружении (все образцы до точки излома и образец 4 на протяжении всего опыта) кривые имеют схожий вид в обеих плоскостях. Вид локальных кривых для угла излома 180° , соответствующего простой разгрузке, также сохраняется.

На ниспадающем участке «нырка» в плоскости $S_1 - \Theta_1$ происходит упругая разгрузка для образцов, подверженных сжатию и сжатию с кручением, и упругое нагружение при растяжении с реверсивным кручением, на диаграмме $S_3 - \Theta_3$ упругая разгрузка происходит при растяжении с реверсивным кручением. На восходящей ветви «нырка» упругая разгрузка по растяжению-сжатию продолжается, но происходит активное пластическое деформирование от кручения, что и является причиной прекращения частичной упругой разгрузки материала.

Рисунок 4.19 – Локальные диаграммы $S_1 - \varepsilon_1$ Рисунок 4.20 – Локальные диаграммы $S_3 - \varepsilon_3$

В некоторых экспериментах проявлялся Ξ_2 -эффект, когда исследуемые траектории незначительно выходили из рассматриваемой плоскости. В расчетах принималось $\Xi_2 = 0$.

На рисунке 4.21 приведены зависимости угла сближения ϑ_1 от длины дуги траектории Δs , для большей наглядности в качестве начала отсчета принята точка излома траектории деформирования. На первом участке при простом пропорциональном деформировании во всех опытах угол сближения, характеризующий векторные свойства материалов, имеет значения, близкие к нулю. После излома траектории деформирования наблюдается скачкообразное возрастание угла на величину, близкую к значению угла излома α_b , с последующим уменьшением по закону, близкому к экспоненциальному. Угол ϑ_1 для отраженных траекторий также совпадает с точностью до 5 %.

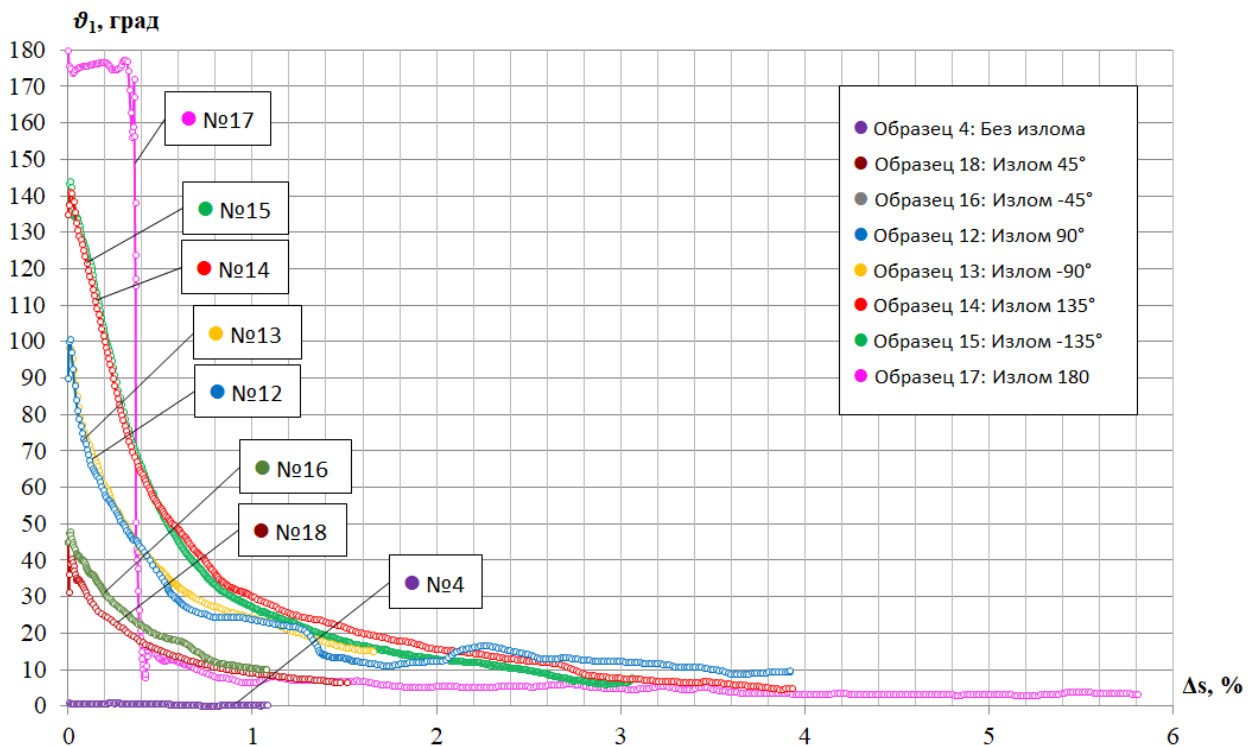


Рисунок 4.21 – Диаграмма угла сближения $\vartheta_1 - s$

4.4. Эксперименты с большими углами излома по типу пропорционально смещённого на 1 % веера

Анализ исследований других авторов и результаты, полученные в вышеописанных опытах, показывают, что интерес также представляет изучение поведения материалов в больших углах излома траектории. В данной группе опытов была расширена серия экспериментов, посвященных изучению смещённого веера из двухзвенных ломаных траекторий. Начальное деформирование производилось пропорциональным растяжением с кручением до $\Theta = s = \sqrt{2} \% \approx 1,41 \%$. Были выбраны углы излома более 135° с шагом 15° .

Таким образом, группа представляет собой пропорционально смещённый веер из двухзвенных ломаных траекторий. Излом каждой траектории осуществлялся при $\Theta_1 = \Theta_3 = 1 \%$, значения углов излома и вид нагружения после излома представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры экспериментов

№ образца	Угол излома траектории	Вид нагружения после излома
19	180	Простая разгрузка
21	150	Сжатие с реверсивным кручением
22	165	Сжатие с реверсивным кручением
23	-150	Сжатие с кручением

Эксперименты осуществлялись при нормальных температуре и давлении. Напряженное состояние оболочек рассматривалось как плоское, а материал в зоне пластичности считался несжимаемым, приближенно имеющим значение коэффициента Пуассона $\mu \rightarrow 0,5$.

Программы экспериментов были реализованы в плоскости $\Theta_1 - \Theta_3$ (показаны на рисунке 4.22). Отклик на реализуемую программу в плоскости $S_1 - S_3$, соответствующий программе, реализовывался в векторном пространстве девиатора напряжений (рисунок 4.23).

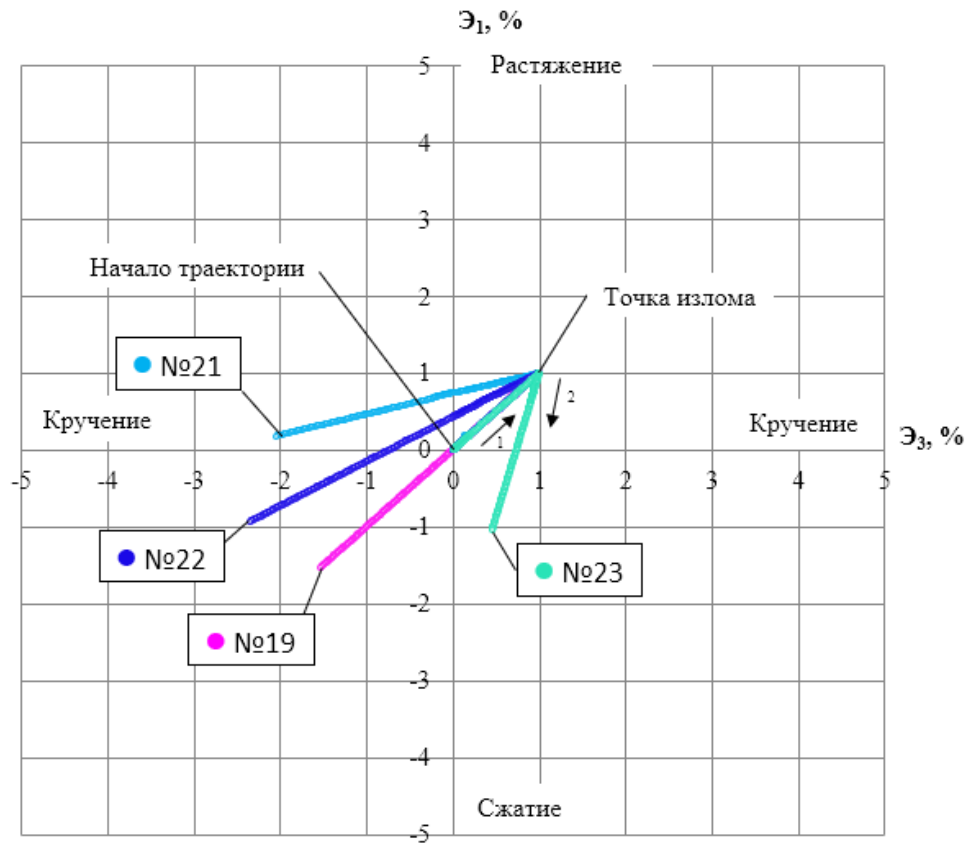


Рисунок 4.22 – Программы испытания оболочек с изломом
при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1 \%$

По результатам обработки полученных опытных данных построены диаграммы деформирования $\sigma - s$ (рисунок 4.24) и $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 4.25). В опытах обнаруживалось проявление ε_2 -эффекта, когда компонента ε_2 имела значение отличное от нуля, однако поскольку значение ε_2 незначительное в расчетах оно не использовалось [43].

По мере увеличения угла излома траектории глубина падения модуля вектора напряжений продолжает возрастать, плавно приближаясь к значениям при простой разгрузке. Экспериментальные кривые $\sigma = \sigma(s)$ проходят ниже универсальной кривой $\sigma = \Phi(s)$, сохраняя при этом практическую параллельность с ней. С некоторого момента все они сходятся в единую кривую, соответствующую простой разгрузке (рисунок 4.24).

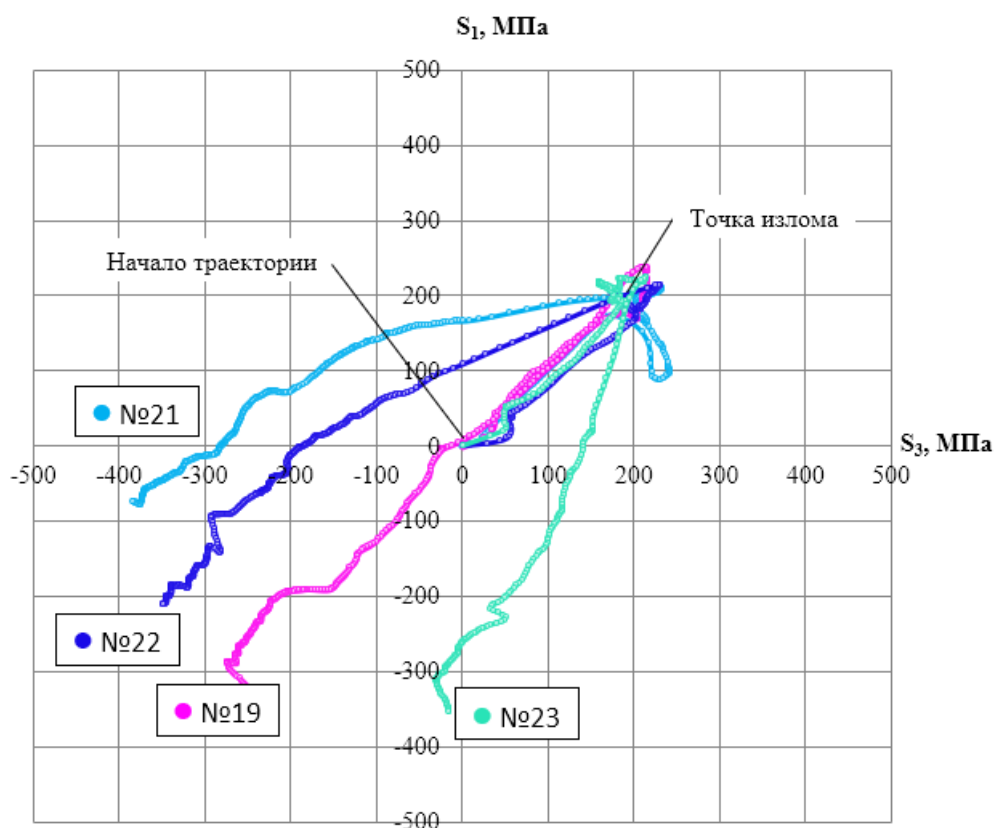
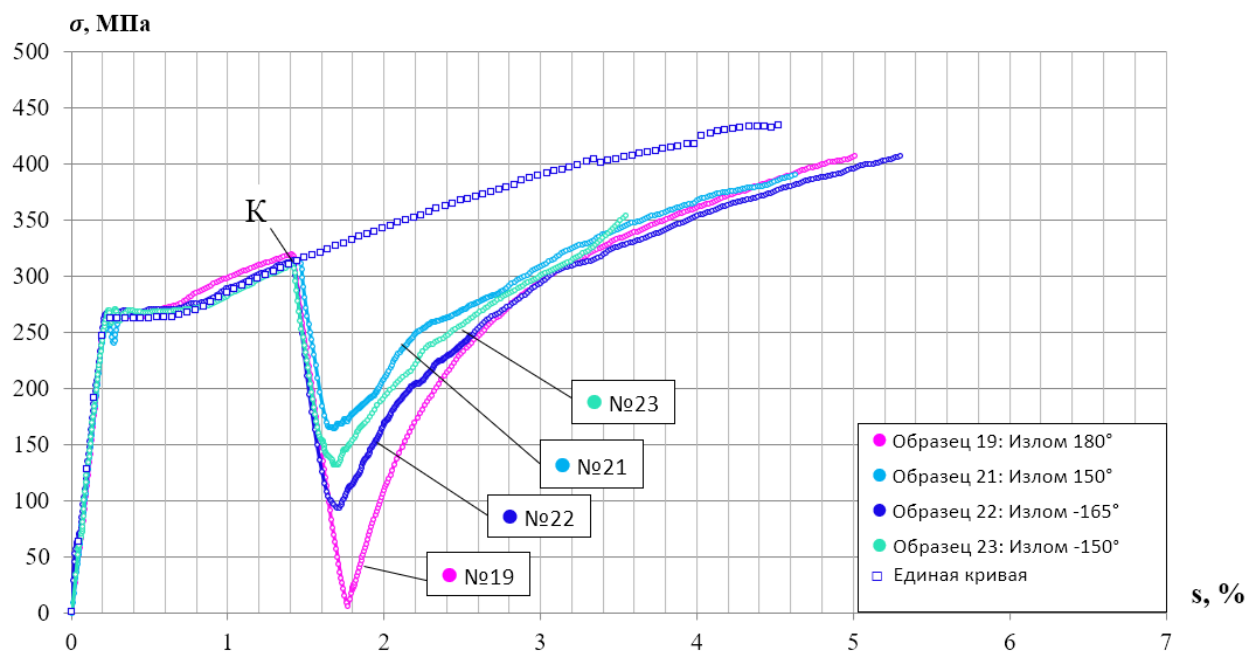


Рисунок 4.23 – Отклик на программы испытаний

Рисунок 4.24– Диаграммы деформирования $\sigma - s$

На диаграмме $\sigma - \varepsilon$ хорошо видно запаздывание скалярных свойств с явной тенденцией к выходу кривой $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ на значения выше универсальной

кривой нагружения $\sigma = \Phi(\varepsilon)$. Это свидетельствует об упрочнении материала, тем больше, чем больше угол излома траектории. Запаздывание наблюдалось для всех испытаний в данной группе, отмечался «нырок» с последующим выходом на общую кривую.

Вид диаграмм как $\sigma - s$, так и $\sigma - \varepsilon$ при зеркальном отражении траекторий деформирования практически одинаковый, отклонение не превышает 10 %.

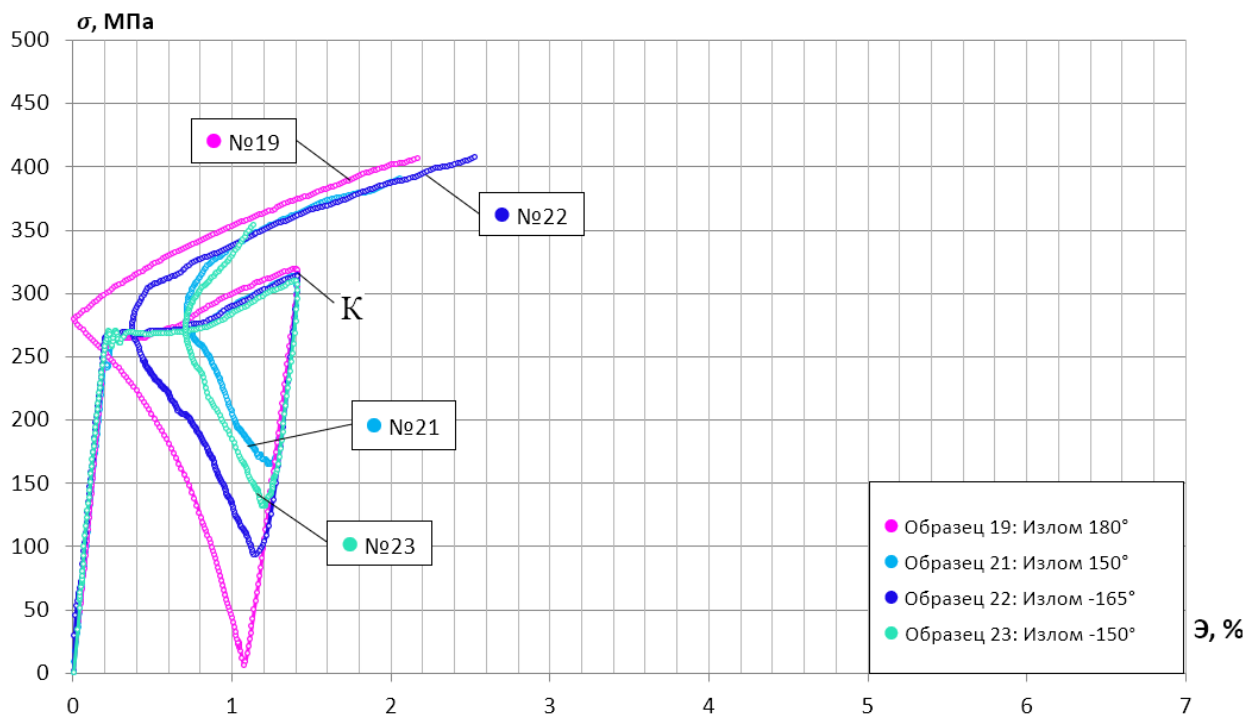


Рисунок 4.25– Диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$

На рисунке 4.26 показаны локальные диаграммы деформирования в плоскости $S_1 - \varepsilon_1$, на рисунке 4.27 – в плоскости $S_3 - \varepsilon_3$. Приведенные результаты подтверждают, что отражение траектории деформирования приводит к зеркальному отображению локальных диаграмм. Так, при изломе траектории на угол 150° на диаграмме $S_1 - \varepsilon_1$ видно более значительное уменьшение компоненты S_1 для образца № 23, а при изломе на угол -150° аналогичное уменьшение наблюдается на диаграмме $S_3 - \varepsilon_3$ для компоненты S_3 образца № 21. Для угла излома 180° (простая разгрузка) вид локальных

кривых повторяется в обеих плоскостях. На ниспадающем участке «нырка» происходит упругая разгрузка всех образцов.

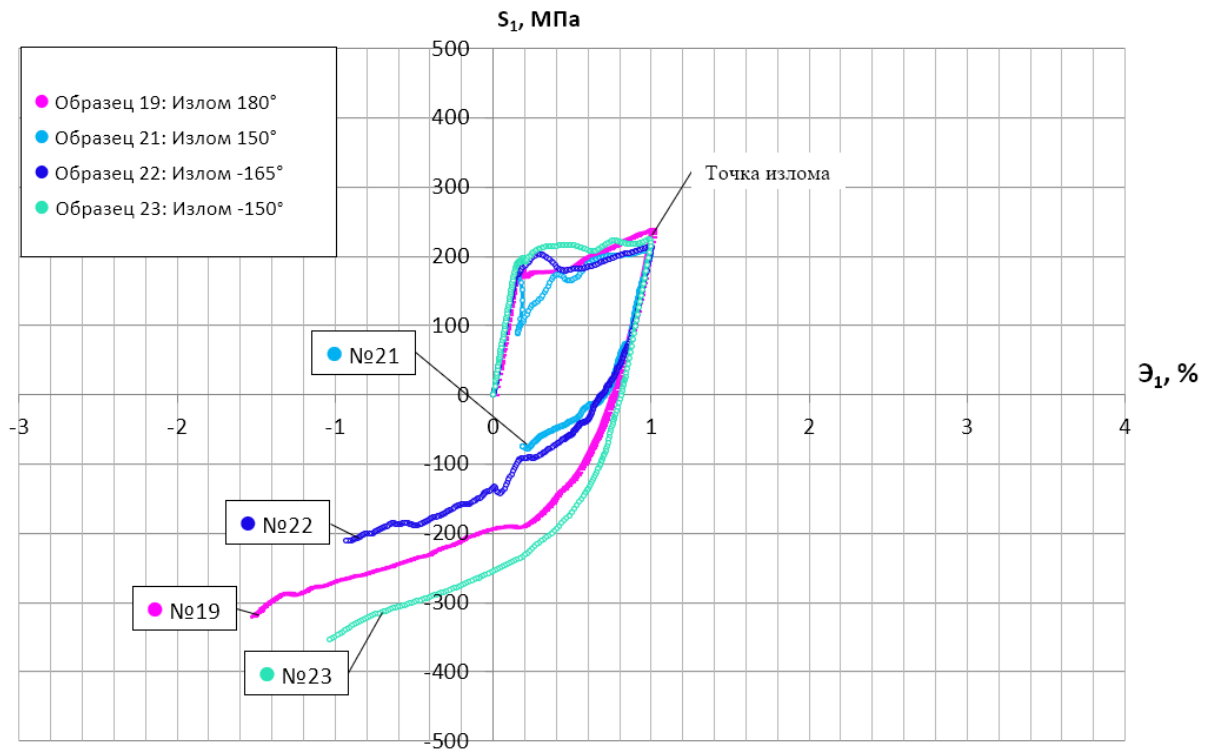


Рисунок 4.26 – Локальные диаграммы $S_1 - \epsilon_1$

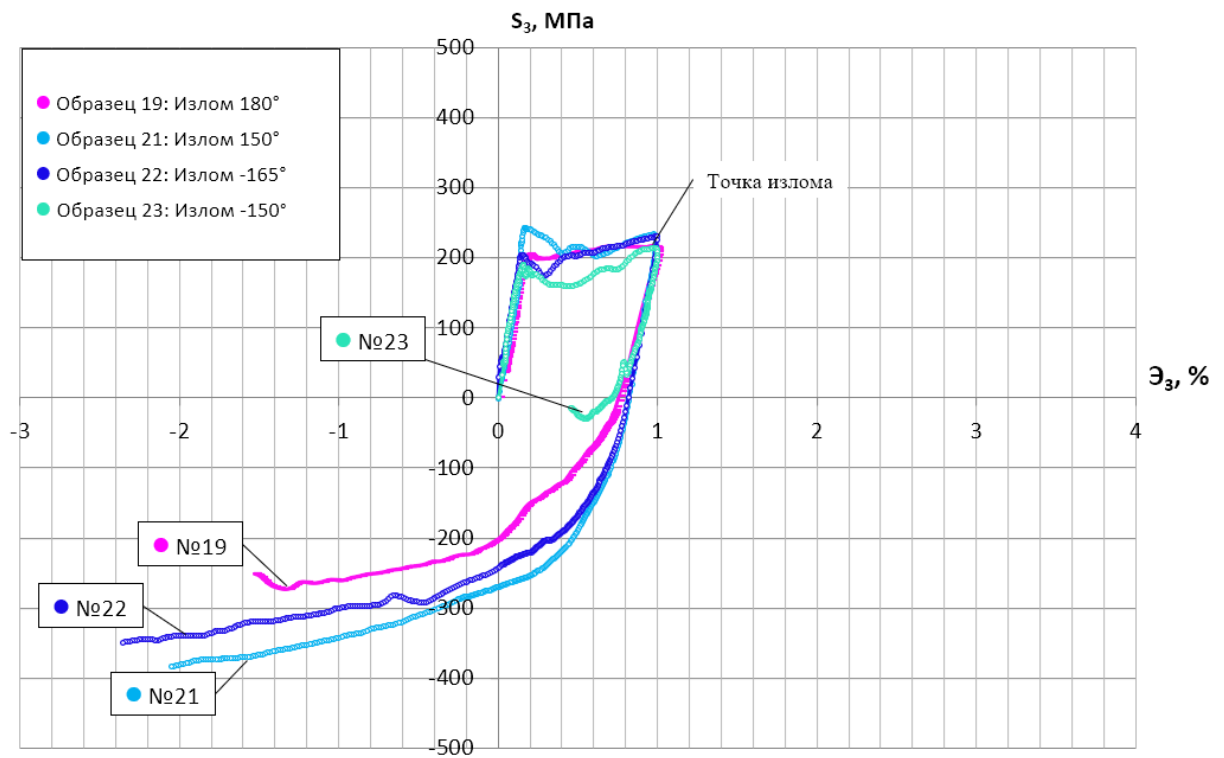


Рисунок 4.27 – Локальные диаграммы $S_3 - \epsilon_3$

В некоторых экспериментах проявлялся Ξ_2 -эффект, когда исследуемые траектории незначительно выходили из рассматриваемой плоскости. В расчетах принималось $\Xi_2 = 0$.

На рисунке 4.28 приведены зависимости угла сближения ϑ_1 от длины дуги траектории Δs , для большей наглядности в качестве начала отсчета принята точка излома траектории деформирования. На первом участке при простом пропорциональном деформировании во всех опытах угол сближения, характеризующий векторные свойства материалов, имеет значения, близкие к нулю. После излома траектории деформирования наблюдается скачкообразное возрастание угла на величину, близкую к значению угла излома α_b с последующим уменьшением по закону, близкому к экспоненциальному. Угол ϑ_1 для отраженных траекторий также совпадает с точностью до 5 %.

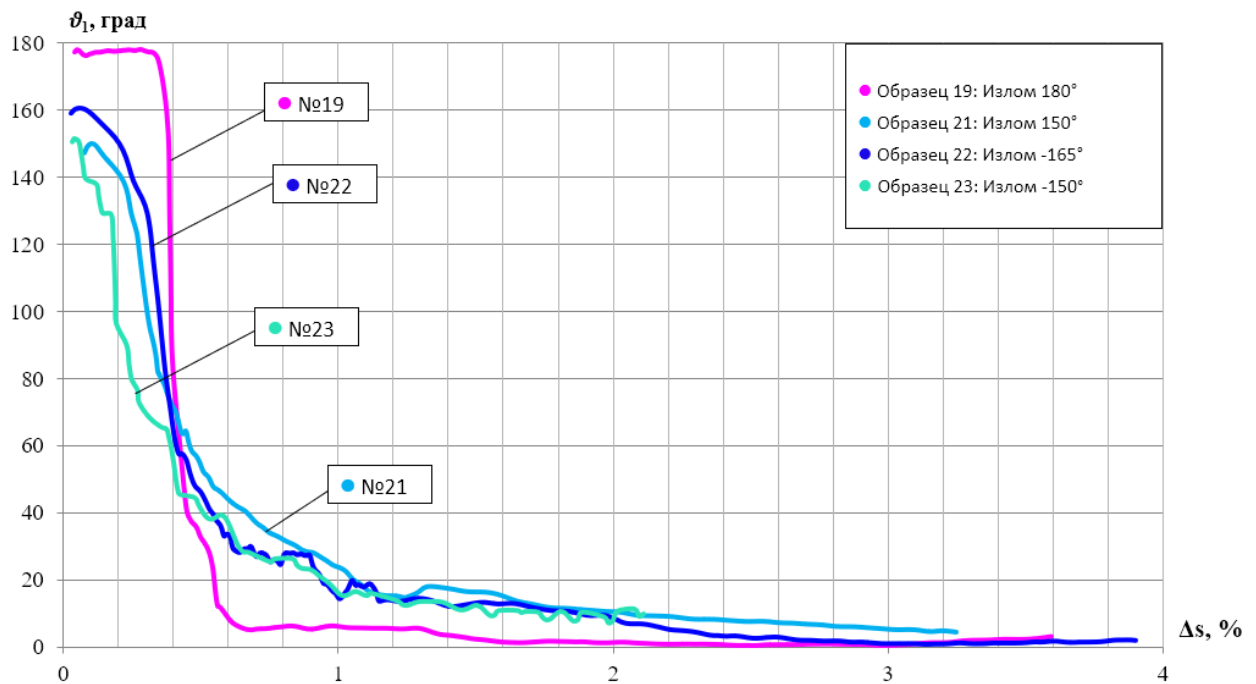


Рисунок 4.28 – Диаграмма угла сближения $\vartheta_1 - s$

ГЛАВА 5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕКТОРНЫХ И СКАЛЯРНЫХ СВОЙСТВ, ФУНКЦИОНАЛОВ ПЛАСТИЧНОСТИ

5.1. Аппроксимация экспериментальных диаграмм деформирования

Сложность получения универсальных уравнений для произвольных траекторий деформирования обусловлена рядом причин, среди которых полуаналитический характер применяемых уравнений, зависимость от реализуемой траектории, различный физический смысл определяющих соотношений в пространствах напряжений и деформаций и т. д. [55].

Для упрощения расчетов и анализа результатов был разработан автоматизированный расчетный модуль Process. Интерфейс программы показан на рисунке 5.1. Программа позволяет сглаживать исходные данные, рассчитывать координаты векторов напряжений в Σ_3 и деформаций в E_3 , модули девиаторов напряжений σ и деформаций ε , косинусы угла отклонения ϑ_1 вектора напряжений $\bar{\sigma}$ от касательной к траектории деформирования, аппроксимировать экспериментальные данные.

№ п.п.	Участок	Time	$\varepsilon_{11}, \%$	$\varepsilon_{22}, \%$	$\varepsilon_{12}, \%$	$\sigma_{11}, \text{МПа}$	$\sigma_{22}, \text{МПа}$	$\sigma_{12}, \text{МПа}$
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	141	0.012	-0.008	0.02082	17.4506	0	25.8982
3	1	165	0.008	-0.024	0.02082	22.8663	0	29.13548
4	1	181	0.016	-3.60E-02	0.02082	28.88375	0	33.99139
5	1	183	0.016	-0.032	0.02082	29.48549	0	33.99139
6	1	208	0.02	-0.004	0.02082	39.71516	0	34.96258
7	1	208	0.016	-0.008	0.02082	40.91864	0.4535916	35.2863
8	1	236	0.028	2.662E-10	0.02429	50.54656	0	28.48803
9	1	277	0.028	-0.008	0.02429	57.7675	0	40.78967
10	1	293	0.028	-0.004	0.03123	63.78495	0	36.90494
11	1	296	0.032	-0.004	0.03123	62.58146	0	36.25749
12	1	304	0.032	-0.004	0.03123	63.1832	0	36.58121
13	1	312	0.032	-0.004	0.03123	63.1832	0.9071833	36.90494
14	1	320	0.028	0.008	0.03123	63.1832	0.4535916	36.90494
15	1	328	0.032	0.008	0.03123	63.1832	0	36.90494
16	1	336	0.032	-0.004	0.03123	68.59891	0	46.61677
17	1	349	0.036	0.004	0.03123	71.60763	0	44.02695
18	1	357	0.036	0.008	0.0347	75.2181	0	48.55914
19	1	365	0.04	0.008	0.0347	77.62508	0	54.0625

Рисунок 5.1 – Интерфейс программы

Для реализации программы была выбрана среда MS Excel. Выбор среды табличного процессора обусловлен высокой степенью унификации и повсеместной доступностью данного программного обеспечения в проектных организациях строительного профиля. Это позволяет исключить необходимость приобретения дополнительных специализированных программных продуктов и минимизирует временные затраты на освоение разработанного инструментария инженерно-техническим персоналом. Кроме того, современные программные комплексы, такие как ANSYS, Abaqus, Midas Civil, легко экспортируют массивы данных в формат .csv / .xlsx, что позволяет легко интегрировать полученные результаты.

Анализ экспериментальных данных показал, что при больших углах излома α_{bi} функция Ω , описывающая скалярное падение модуля вектора напряжений после излома траектории в условиях сложной разгрузки и повторного пластического деформирования, отклоняется от экспериментальных данных. Для увеличения точности аппроксимации экспериментальных результатов предлагается выделить на диаграммах $\sigma - s$ дополнительный пятый характерный участок (рисунок 5.2).

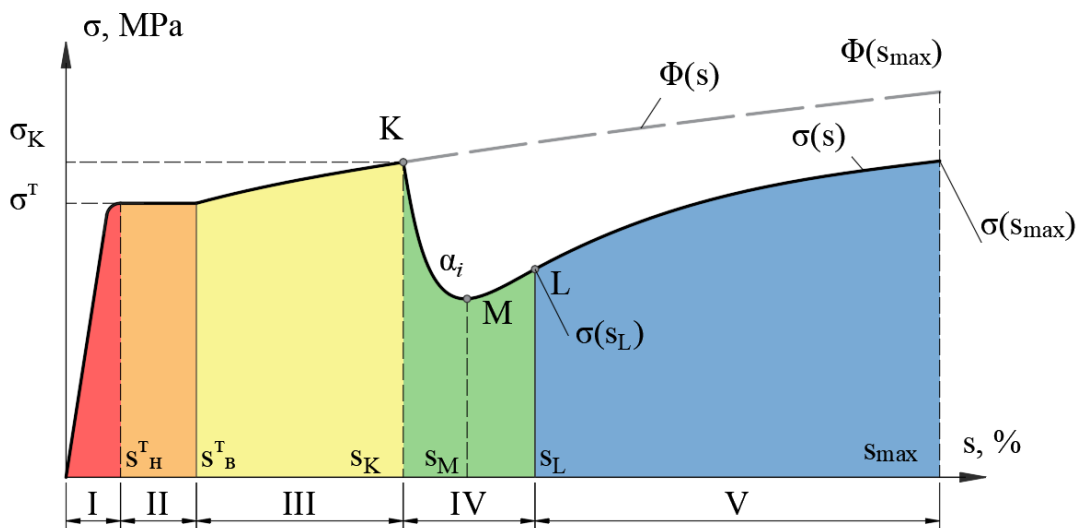


Рисунок 5.2 – Диаграмма деформирования

Основной функцией для описания исследуемых в опытах процессов с учётом скалярных и векторных свойств была система (5.1):

$$\sigma = \sigma(s) = \begin{cases} 2Gs, \text{ при } s \leq s_H^T & \text{участок I} \\ \sigma^T, \text{ при } s_H^T < s \leq s_B^T & \text{участок II} \\ \sigma^T + \sigma_a \cdot (1 - e^{-\beta \cdot (s - s_B^T)}), \text{ при } s_B^T < s \leq s_K & \text{участок III} \\ \Phi(s) + Af_0^p \Omega(\Delta s), \text{ при } s > s_K & \text{участки IV – V} \end{cases} \quad (5.1)$$

Подбор параметров аппроксимации производился по условию минимизации среднего значения модуля разности экспериментальных и расчетных значений с использованием метода обобщённого понижающего градиента. Результаты подобранных параметров аппроксимаций A, b, γ, p, q для траекторий с различными углами излома приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры аппроксимации

№	α_b	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

Систему, более точно описывающую поведение экспериментальной кривой на участке V, обозначим $\sigma' = \sigma'(s)$:

$$\sigma' = \sigma'(s) = \begin{cases} \Phi(s) \text{ при } s \leq s_K & \text{участки I – III} \\ \sigma(s) \text{ при } s_K < s \leq s_L & \text{участок IV} \\ \sigma(s_L) + \sigma_a \cdot (1 - e^{-\beta_2 \cdot (s-s_L)}) \text{ при } s > s_L & \text{участок V} \end{cases} \quad (5.2)$$

Вид кривой на участке V эквивалентен кривой на участке III, однако требует нахождения величины длины s_L и параметра β_2 , отличного от β . В таблице 5.2 приведены значения модуля вектора напряжений в характерных точках диаграммы, а также подобранные значения β_2 .

Таблица 5.2 – Параметры аппроксимации

№	α_b	β	β_2	$\Phi(s_{max})$	$\sigma(s_{max})$	$\Phi(s_M)$	$\sigma(s_M)$	$\sigma(s_K)$
7	–45	0,35	0,20	478,39	415,98	309,95	306,52	307,75
8	–135	0,35	0,33	461,08	361,05	325,08	199,93	299,51
9	–90	0,35	0,21	488,22	412,08	320,23	281,39	307,44
10	135	0,35	0,33	477,29	430,55	332,19	212,80	322,70
11	90	0,45	0,21	493,93	440,29	359,46	303,40	339,87
12	90	0,35	0,18	496,25	467,80	407,64	345,15	386,80
13	–90	0,35	0,21	483,95	420,91	401,56	349,51	385,18
14	135	0,35	0,28	476,36	421,45	396,78	242,91	380,59
15	–135	0,30	0,30	458,53	399,64	382,29	239,38	367,61
16	–45	0,30	0,10	476,19	407,89	381,68	368,65	369,95
17	180	0,35	0,41	484,74	441,56	399,82	0,13	379,34
18	45	0,35	0,14	488,16	414,75	385,31	372,12	374,95
19	180	0,35	0,25	481,14	408,13	343,35	6,76	319,64
20	45	0,35	0,17	492,06	452,32	328,15	321,08	322,17
21	150	0,35	0,35	473,45	418,06	325,98	165,03	313,76
22	165	0,35	0,68	484,18	434,95	331,70	94,94	313,81
23	–150	0,35	0,60	444,54	391,73	328,95	132,19	310,28

На рисунке 5.3 приведена диаграмма зависимости параметра A от величины модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$, на рисунке 5.4 – диаграмма зависимости параметра f_0 от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$.

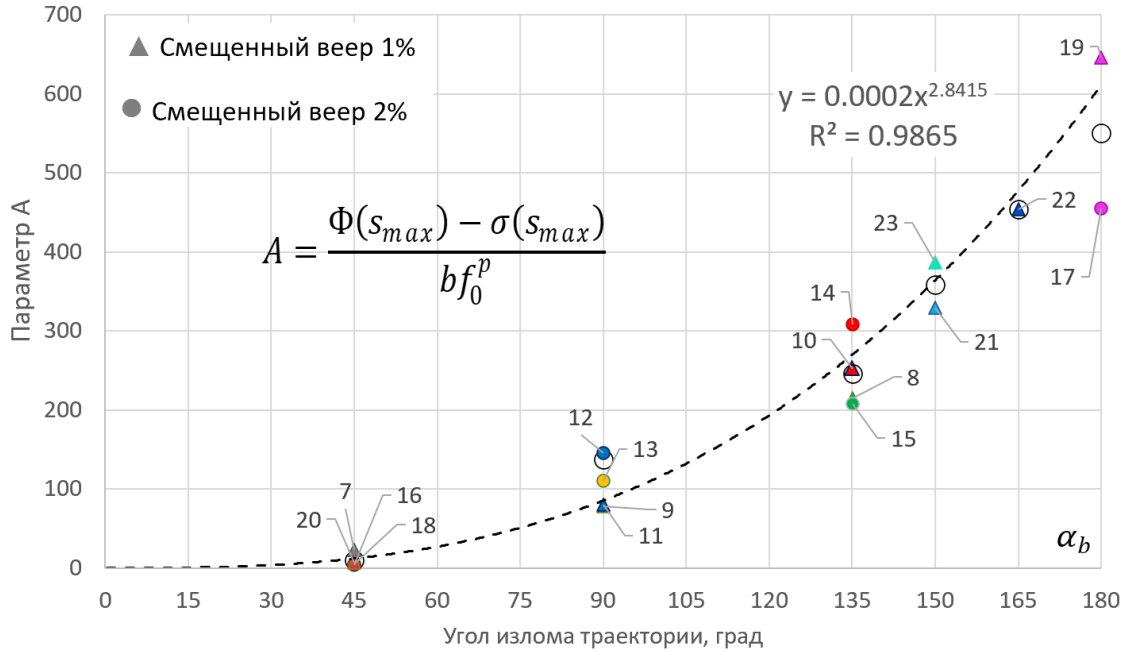


Рисунок 5.3 – Зависимость параметра A от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$

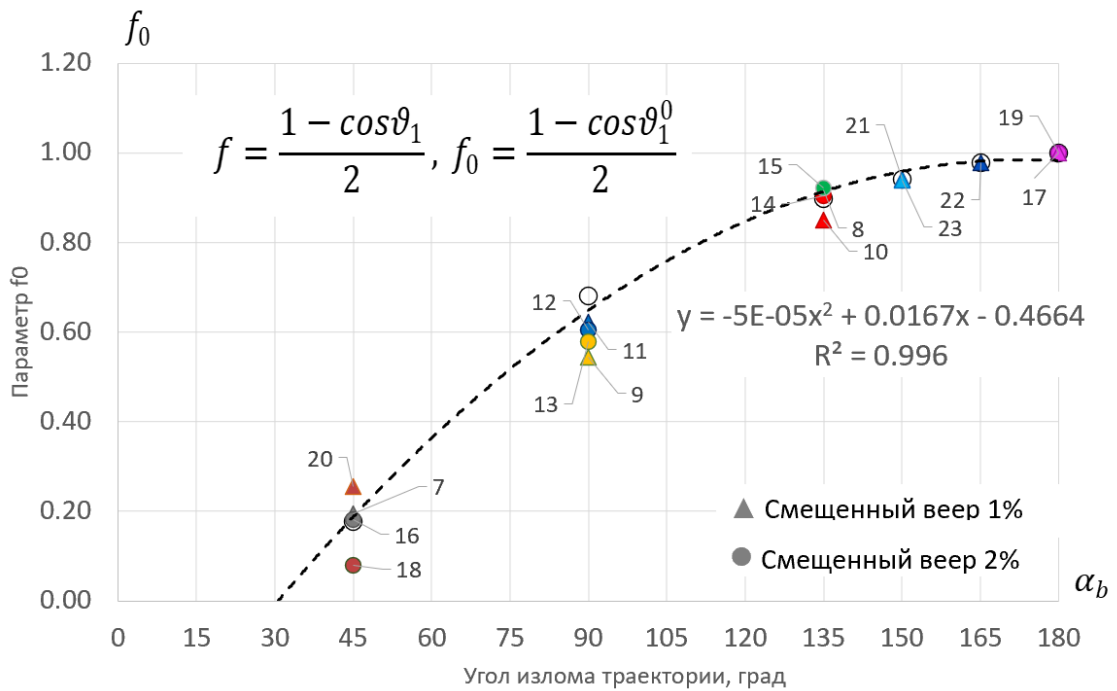


Рисунок 5.4 – Зависимость параметра f_0 от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$

На рисунке 5.5 показана диаграмма зависимости параметра γ от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$, на рисунке 5.6 – диаграмма зависимости параметра b от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$.

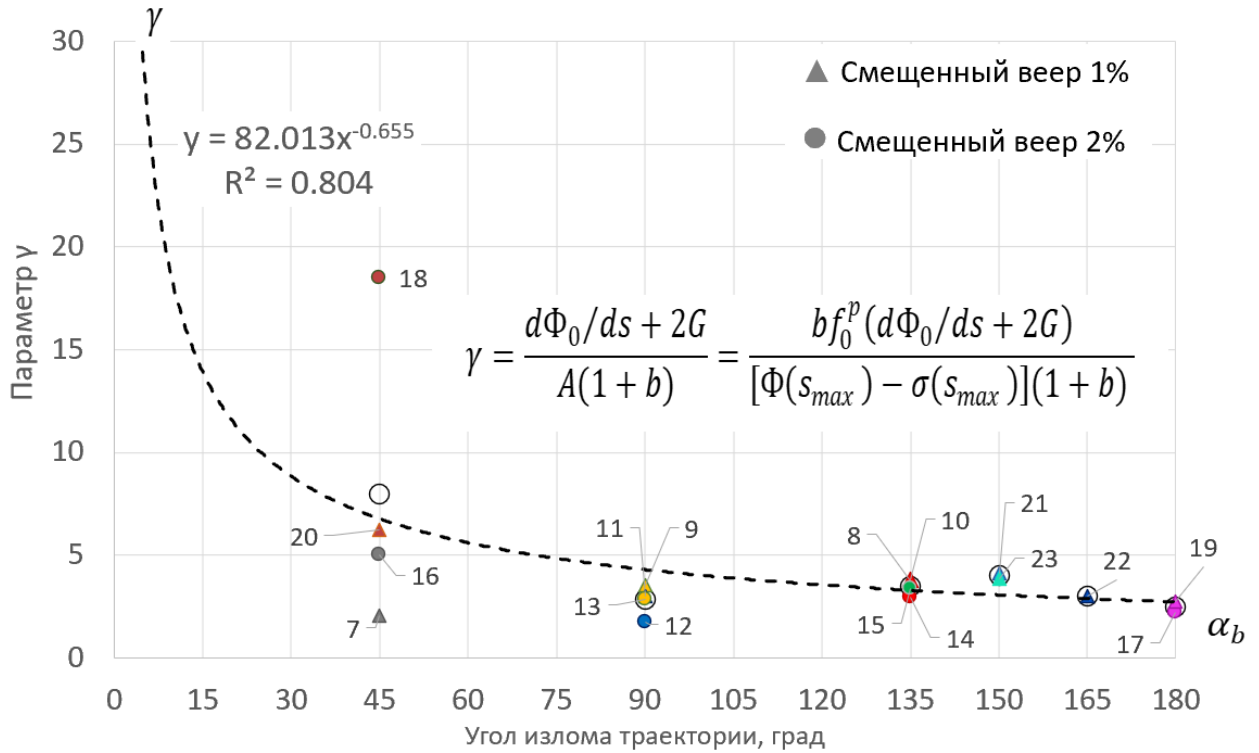


Рисунок 5.5 – Зависимость параметра γ от модуля угла излома $|\alpha_b|$

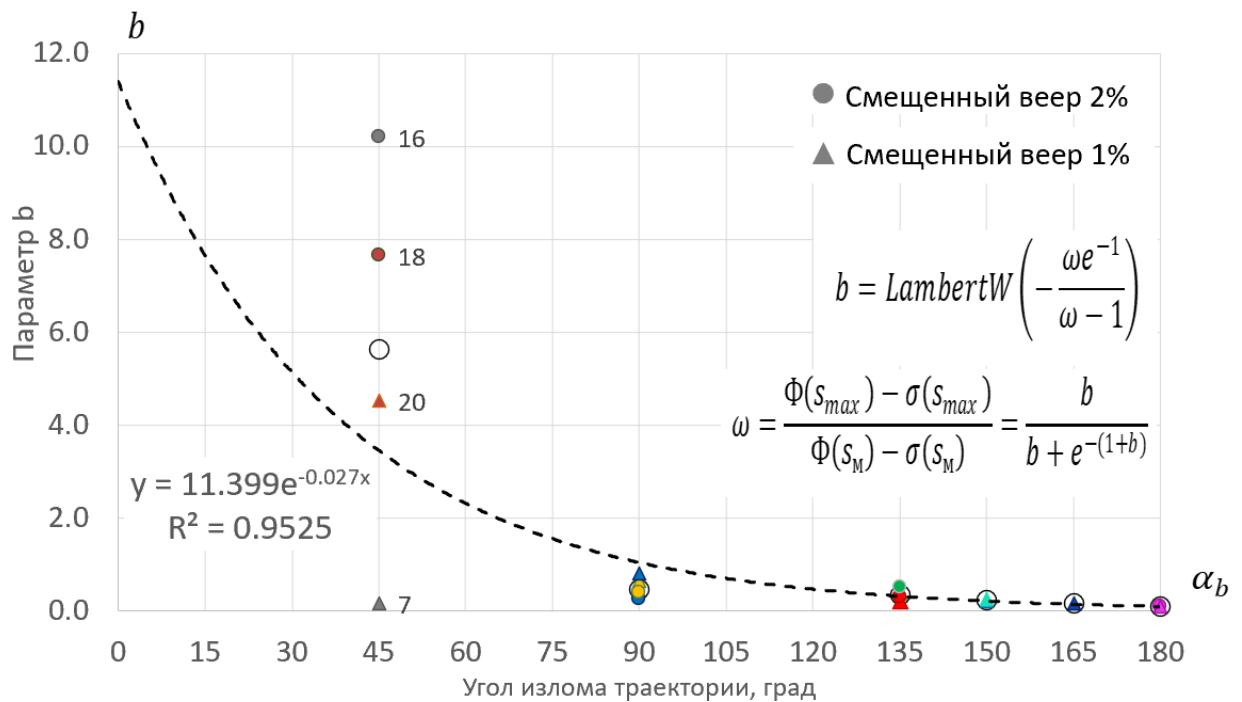


Рисунок 5.6 – Зависимость параметра b от модуля угла излома $|\alpha_b|$

На рисунке 5.7 представлена диаграмма зависимости параметра p от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$, на рисунке 5.8 – диаграмма зависимости параметра q от модуля угла излома траектории $|\alpha_b|$.

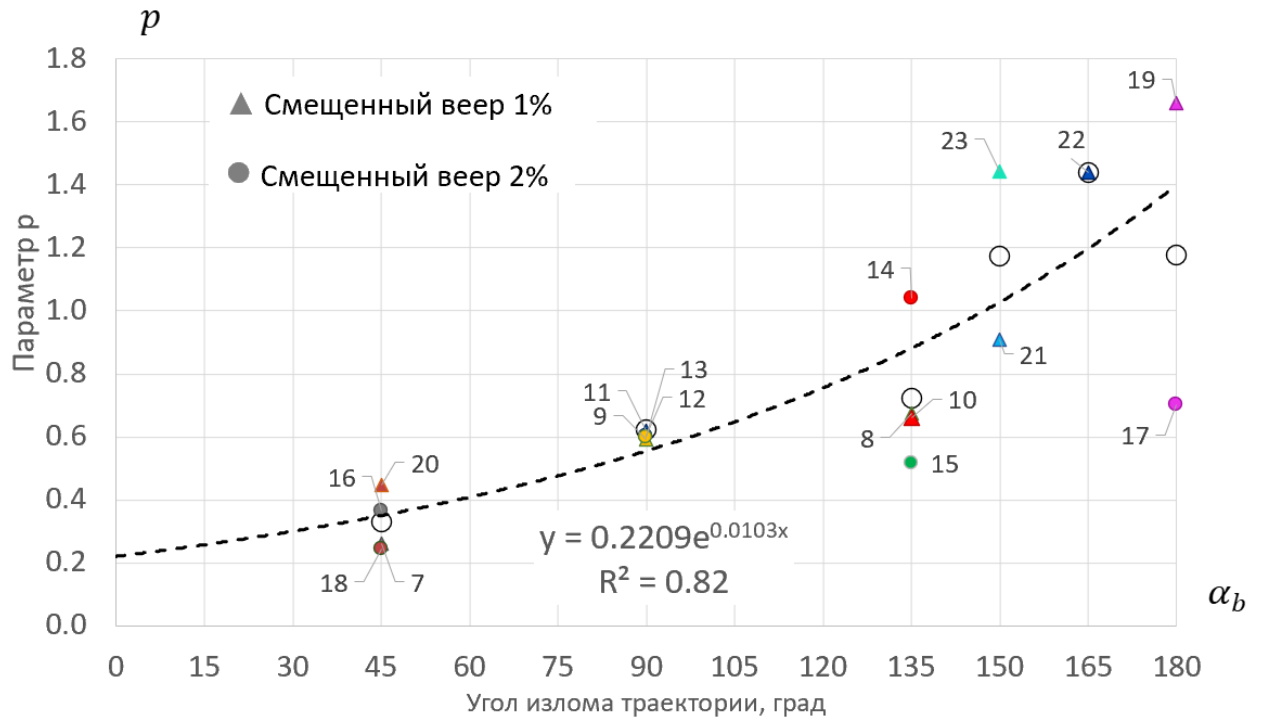


Рисунок 5.7 – Зависимость параметра p от модуля угла излома $|\alpha_b|$

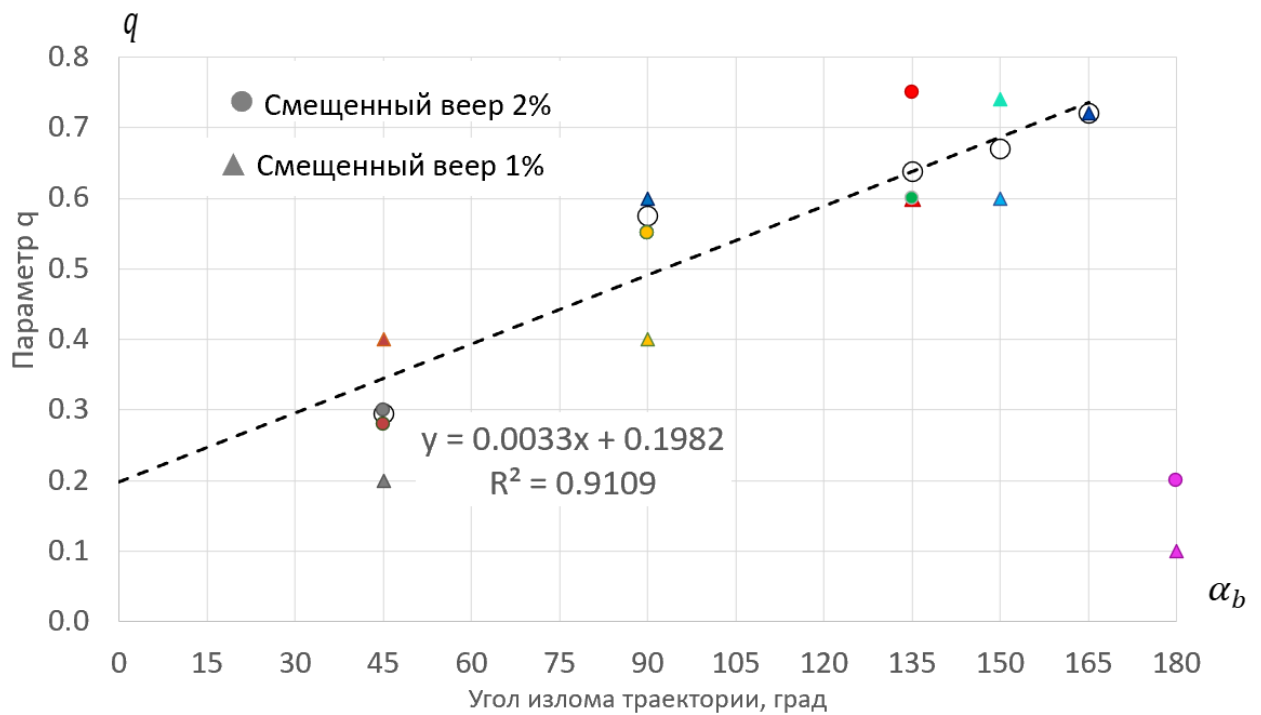


Рисунок 5.8 – Зависимость параметра q от модуля угла излома $|\alpha_b|$

На рисунке 5.9 приведена зависимость минимального значения модуля вектора напряжений от угла излома траектории. На рисунке 5.10 представлена диаграмма, иллюстрирующая влияние угла излома траектории деформирования на глубину «нырка» модуля вектора напряжений в минимальной точке после излома.

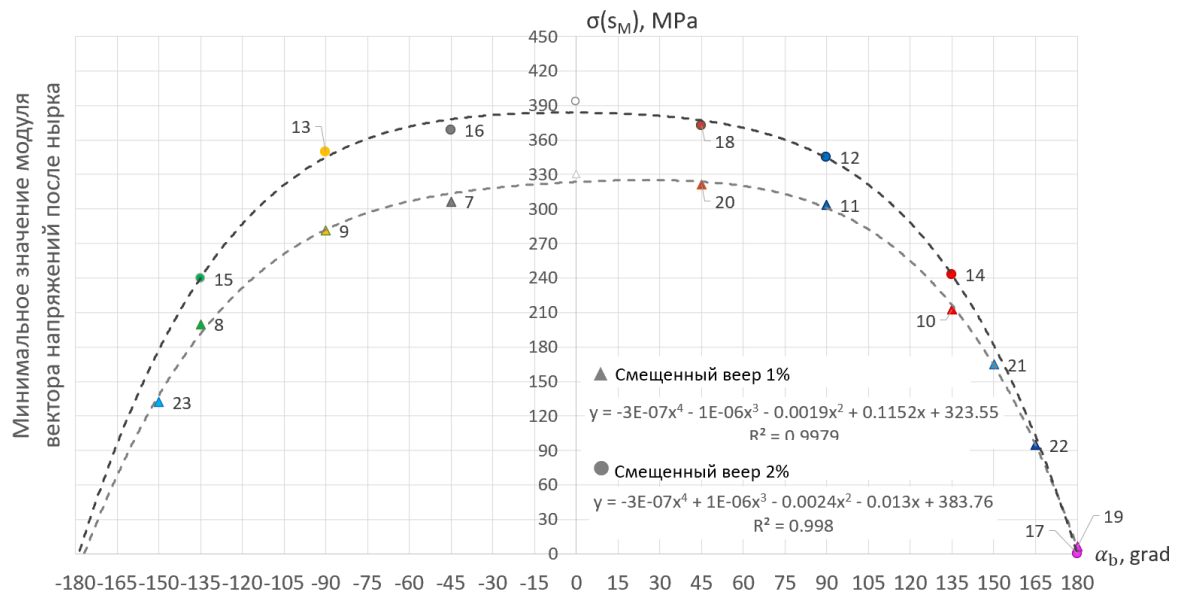


Рисунок 5.9 – Диаграмма зависимости минимального значения модуля вектора напряжений после излома от угла излома траектории

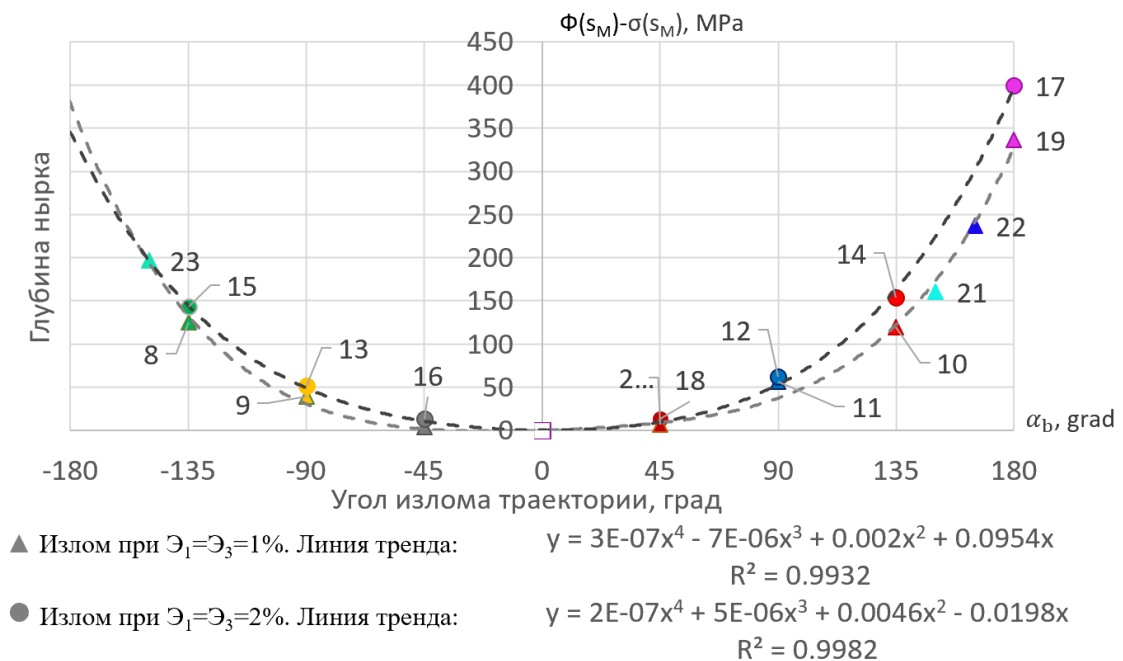


Рисунок 5.10 – Диаграмма зависимости глубины «нырка» модуля вектора напряжений в минимальной точке после излома от угла излома траектории

При совмещении диаграмм с разной длиной участка до излома видно, что общий вид кривых схож, однако подобранные параметры аппроксимации отличаются. Сравнение совмещённых при изломе траектории деформирования на уровне $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1\%$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2\%$ диаграмм $\sigma - s$, $\sigma - \varepsilon$ и $\vartheta_1 - s$ показано на рисунках 5.11–5.13.

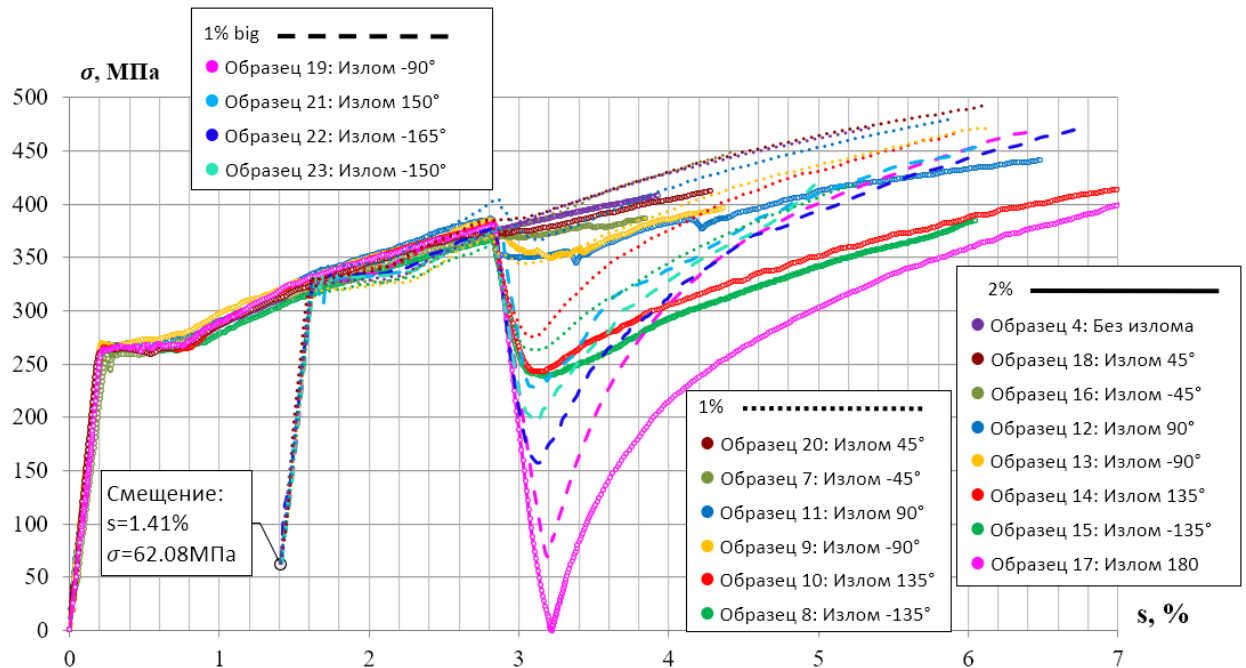


Рисунок 5.11 – Сравнение диаграмм деформирования $\sigma - s$ при 1 % и 2 %

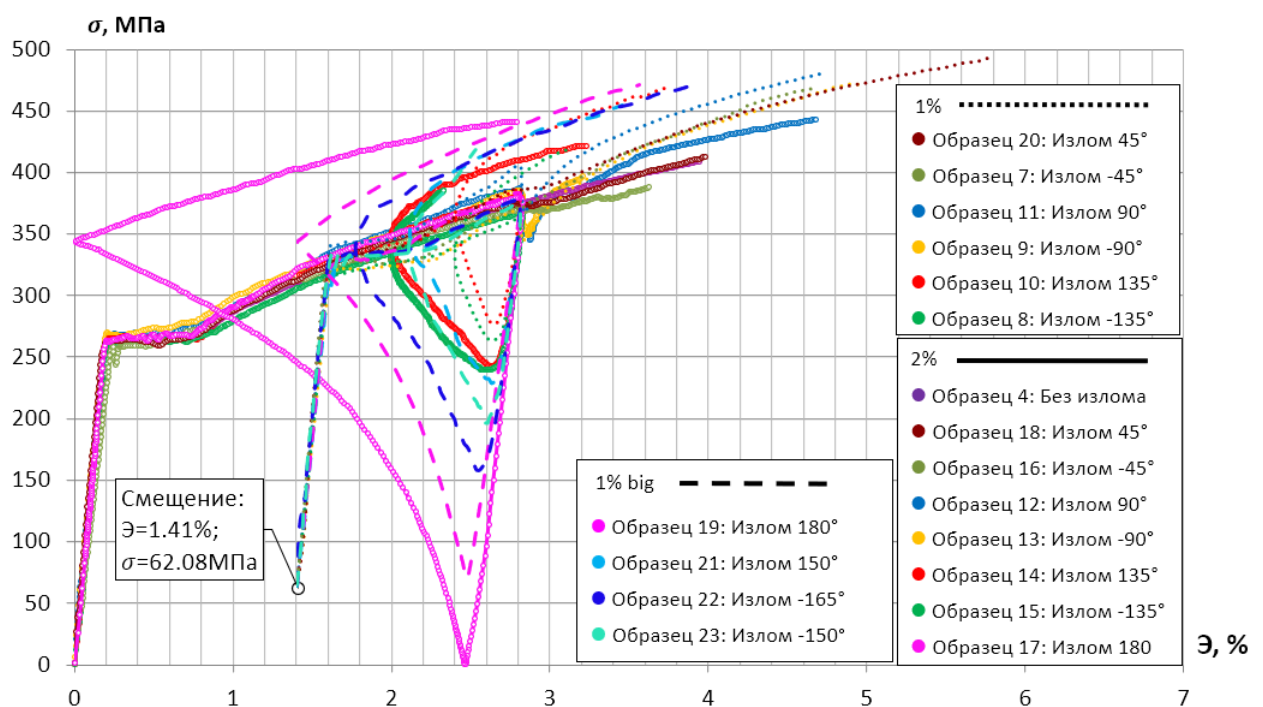


Рисунок 5.12 – Сравнение диаграмм деформирования $\sigma - \varepsilon$ при 1 % и 2 %

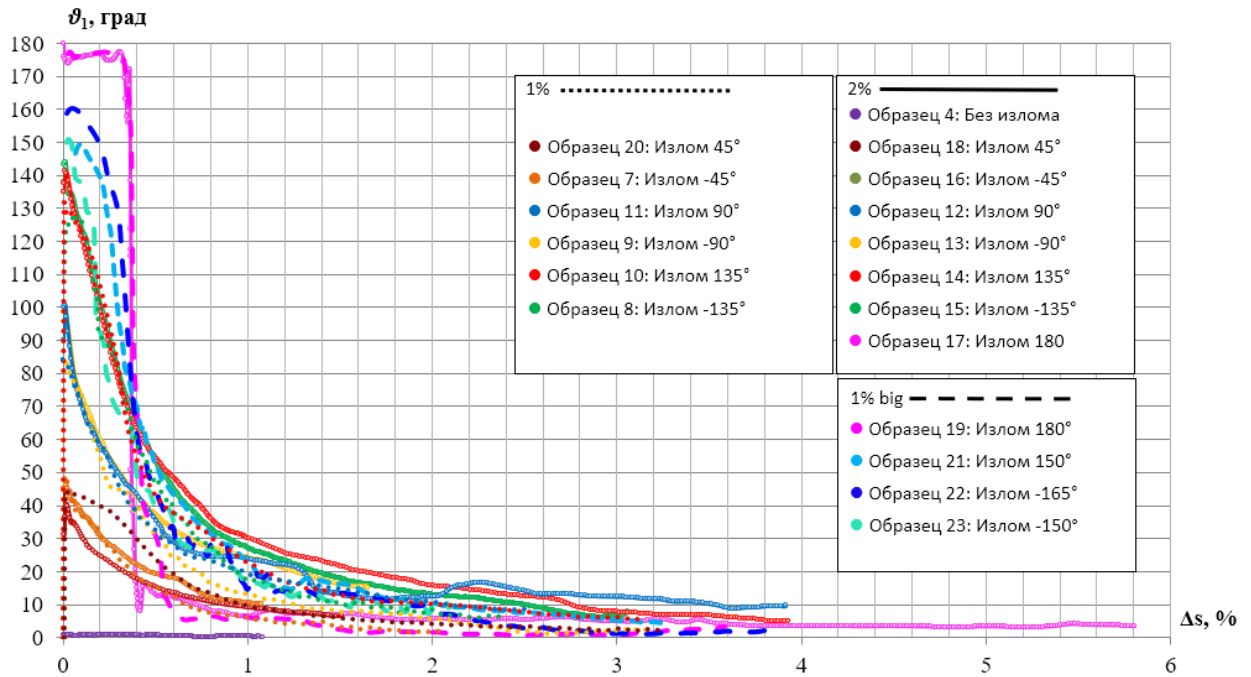


Рисунок 5.13 – Сравнение диаграмм угла сближения ϑ_1 – s при 1% и 2 %

Таким образом, вид зависимости $\vartheta_1(s)$ значительно в меньшей степени зависит от длины предшествующего участка траектории простого (пропорционального) деформирования, чем $\sigma(s)$ и $\sigma(\varepsilon)$.

5.2. Моделирование процесса деформирования

Для решения задачи Коши, вышеописанной системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, в данной работе применялся метод Рунге – Кутты 4-го порядка:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(x, y), \\ x_{i+1} &= x_i + h \\ y_{i+1} &= y_i + \Delta y, \\ \Delta y &= \frac{h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)}{6}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

где x – независимая переменная (время); y – внутренние переменные (искомая функция); i – номер шага интегрирования; h – шаг интегрирования.

$$\begin{cases} k_1 = f(x_i, y_i) \\ k_2 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_1\right) \\ k_3 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_2\right) \\ k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3) \end{cases} \quad (5.4)$$

В нашем случае имеем систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS_i}{ds} = M_1 \frac{d\vartheta_i}{ds} + \left(\frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos\vartheta_1 \right) \frac{S_i}{\sigma}, \quad (5.5)$$

$$\frac{d\vartheta_1}{ds} = -\frac{M_1}{\sigma} \cdot \sin\vartheta_1 = f(s_i, \vartheta_{1i}). \quad (5.6)$$

Задаются значения узлов сетки S_i :

$$s_{i+1} = s_i + h. \quad (5.7)$$

Дополнительно необходимо вычислить центральные значения s'_i :

$$s'_i = s_i + \frac{\Delta s}{2}. \quad (5.8)$$

Значения y_{i+1} в узлах сетки вычисляем, используя соотношение:

$$\vartheta_{1i+1} = \vartheta_{1i} + \frac{\Delta s}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4). \quad (5.9)$$

Коэффициенты находим по формулам:

$$k_1 = f(s_i, \vartheta_{1i}), \quad (5.10)$$

$$k_2 = f\left(s_i + \frac{\Delta s}{2}, \vartheta_{1i} + \frac{\Delta s}{2}k_1\right) = f\left(s'_i, \vartheta_{1i} + \frac{\Delta s}{2}k_1\right),$$

$$k_3 = f\left(s_i + \frac{\Delta s}{2}, \vartheta_{1i} + \frac{\Delta s}{2}k_2\right) = f\left(s'_i, \vartheta_{1i} + \frac{\Delta s}{2}k_2\right),$$

$$k_4 = f(s_i + \Delta s, \vartheta_{1i} + \Delta s \cdot k_3).$$

Шаг интегрирования по длине дуги траектории принимается не более $2 \cdot 10^{-2} \%$. Точность вычисления дополнительно оценивалась по правилу Коллатца:

$$\left| \frac{k_2 - k_3}{k_1 - k_2} \right| < 0,03. \quad (5.11)$$

При недостаточной точности шаг интегрирования может быть уменьшен.

Результаты моделирования процесса сложного деформирования для траектории с углом излома 135° при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2\%$ приведены на рисунках 5.14–5.19 [25]. Экспериментальные и расчетные данные для остальных траекторий представлены совмещёнными диаграммами $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ на рисунках 5.20–5.37.

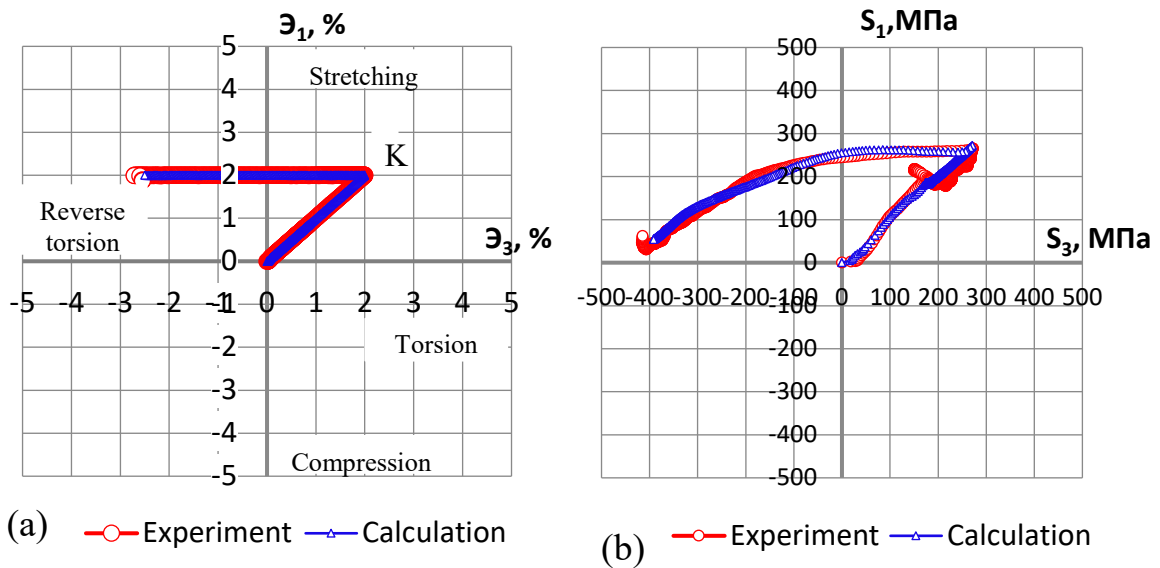


Рисунок 5.14 – Моделирование программы и отклика на программу

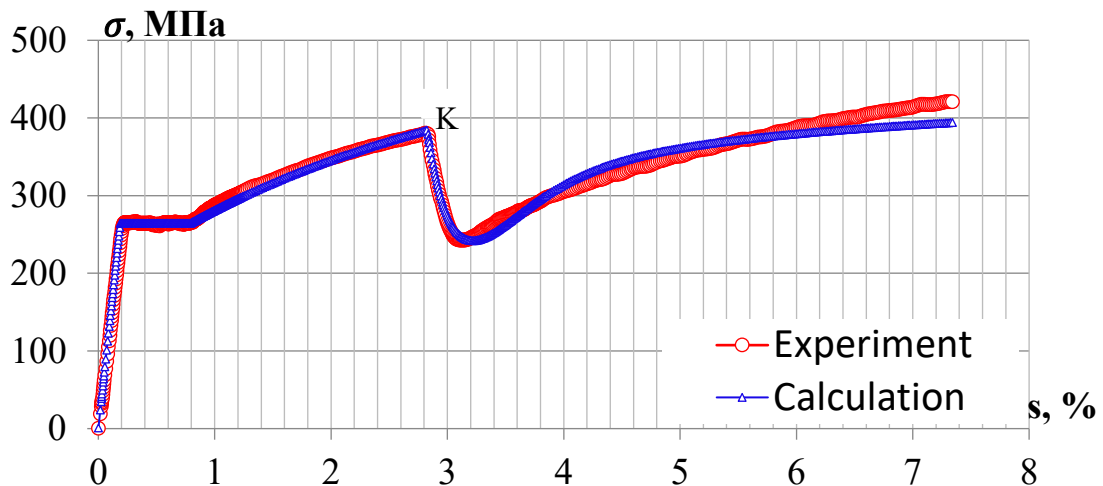


Рисунок 5.15 – Моделирование диаграммы прослеживания процесса $\sigma - s$

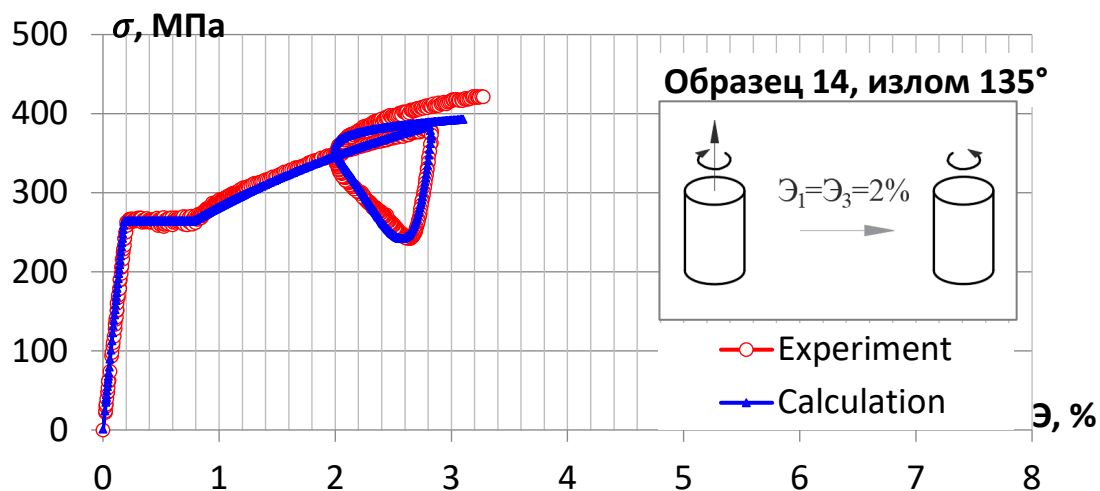


Рисунок 5.16 – Моделирование диаграммы деформирования $\sigma - \varepsilon$

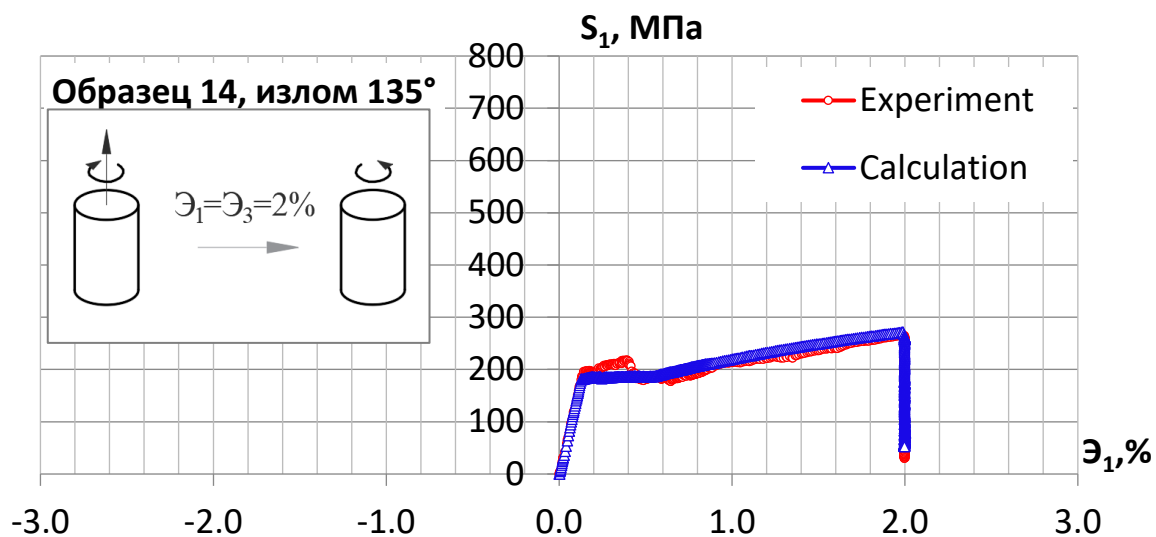


Рисунок 5.17 – Моделирование локальной диаграммы $S_1 - \varepsilon_1$

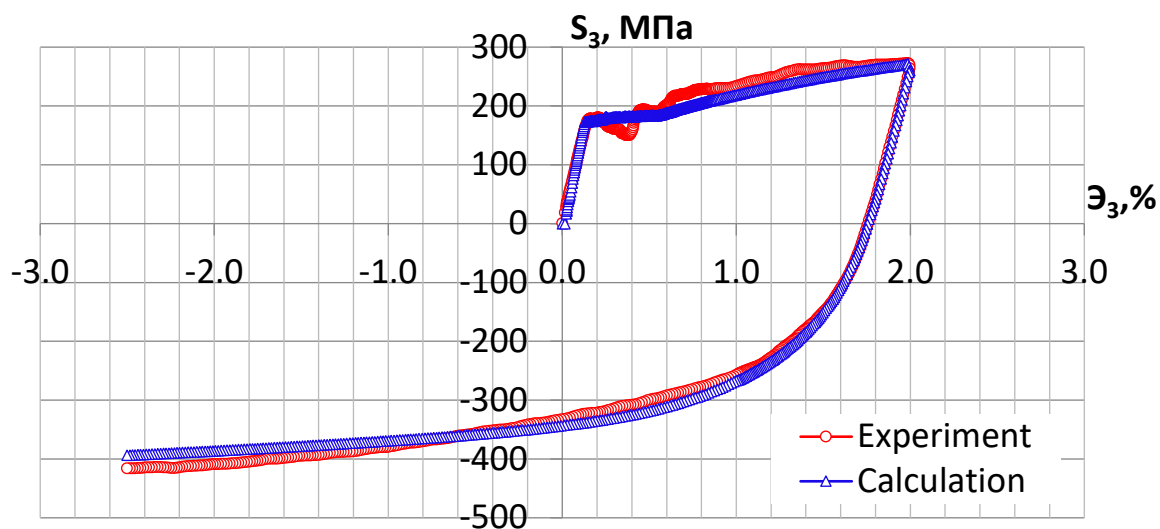


Рисунок 5.18 – Моделирование локальной диаграммы $S_3 - \varepsilon_3$

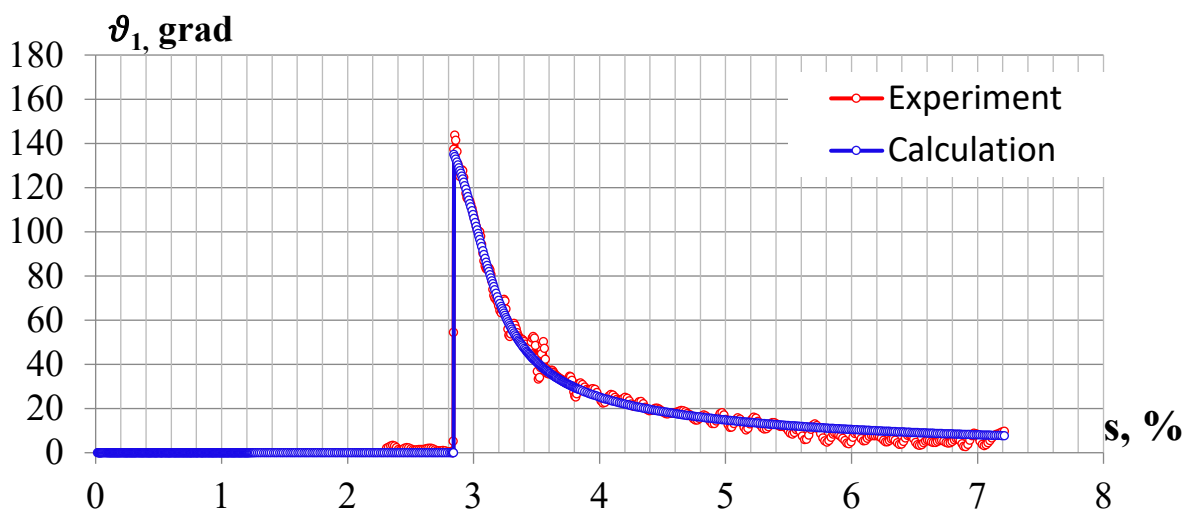


Рисунок 5.19 – Моделирование диаграммы угла сближения $\vartheta_1 - s$

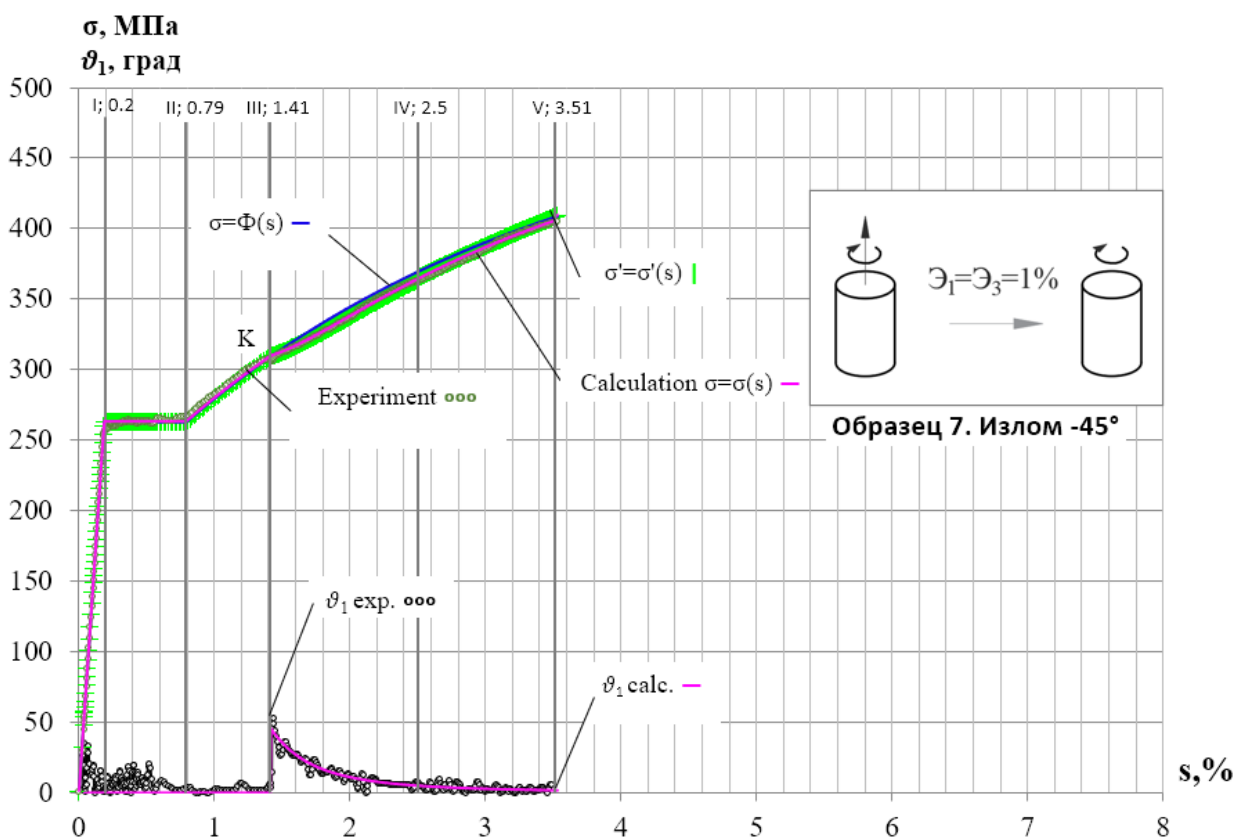
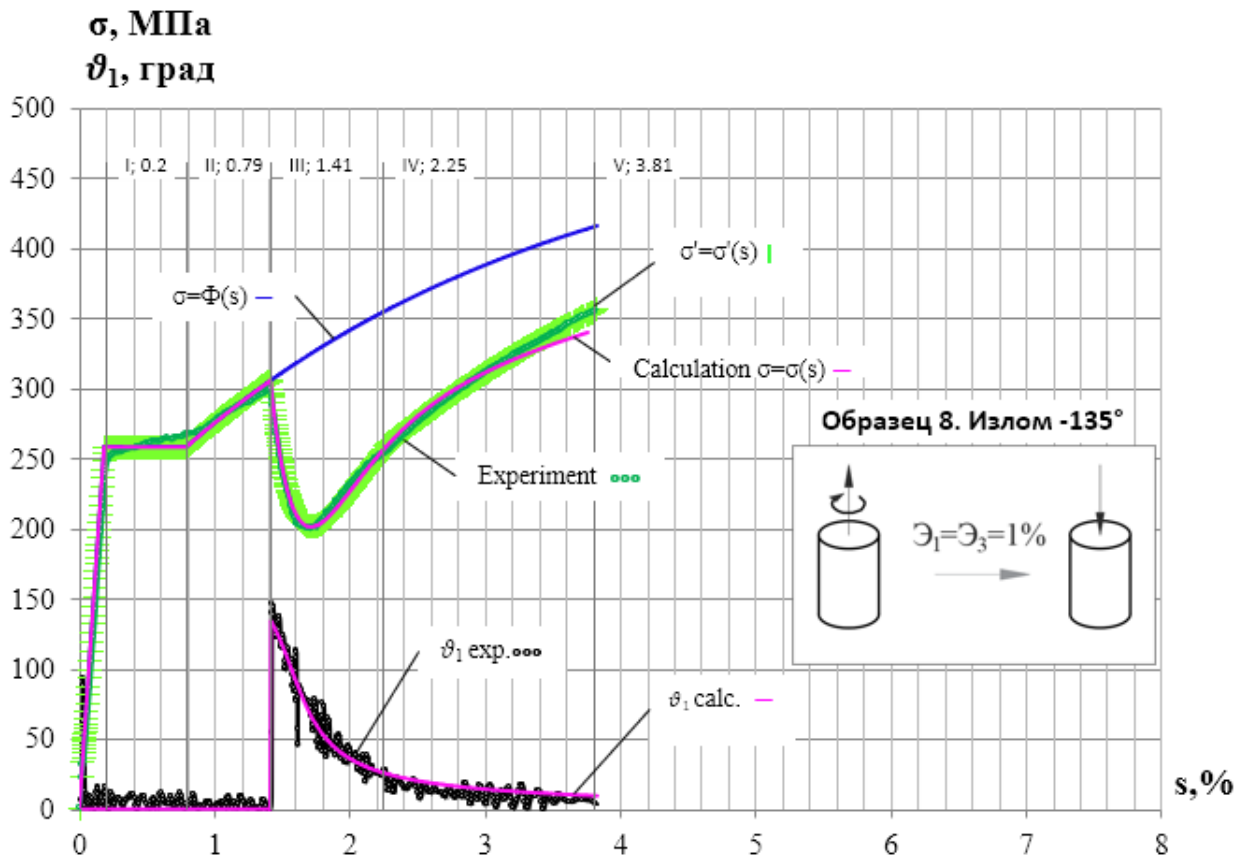
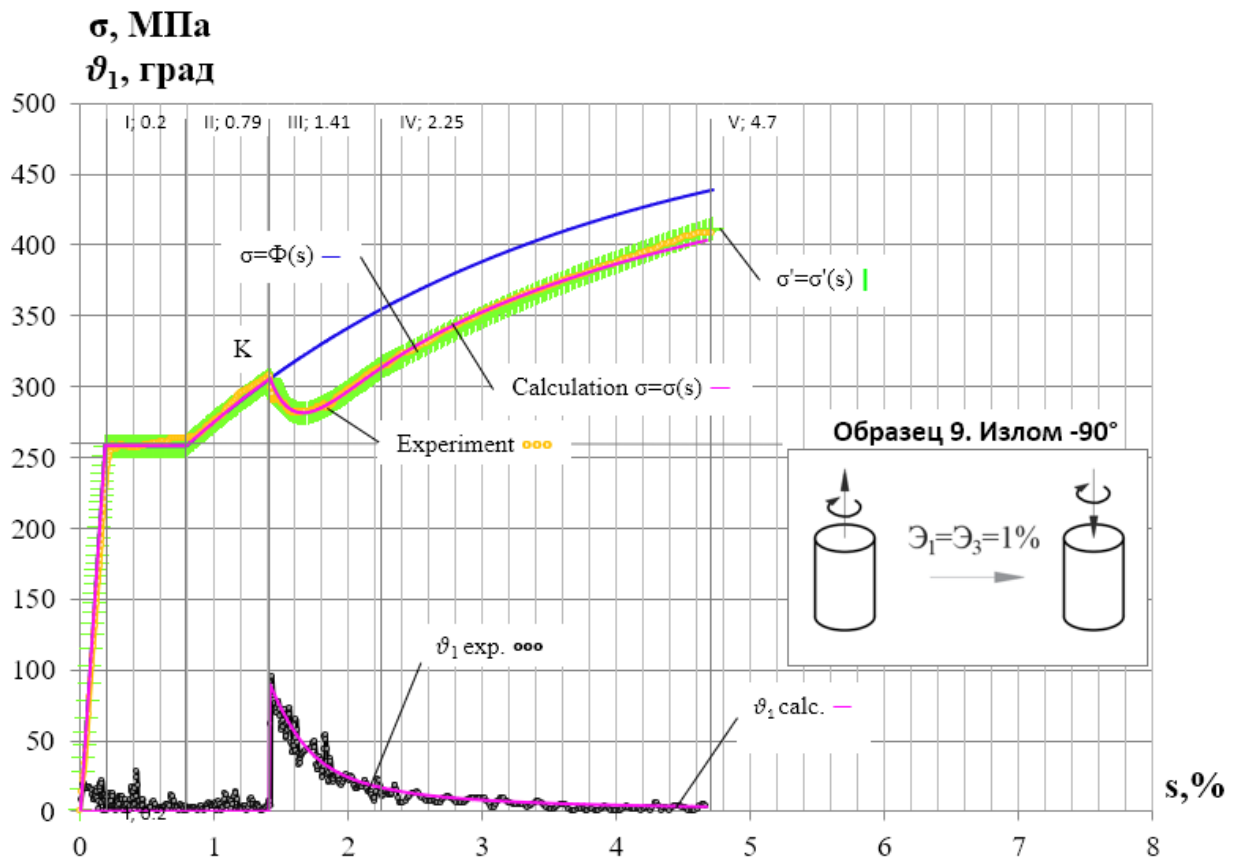
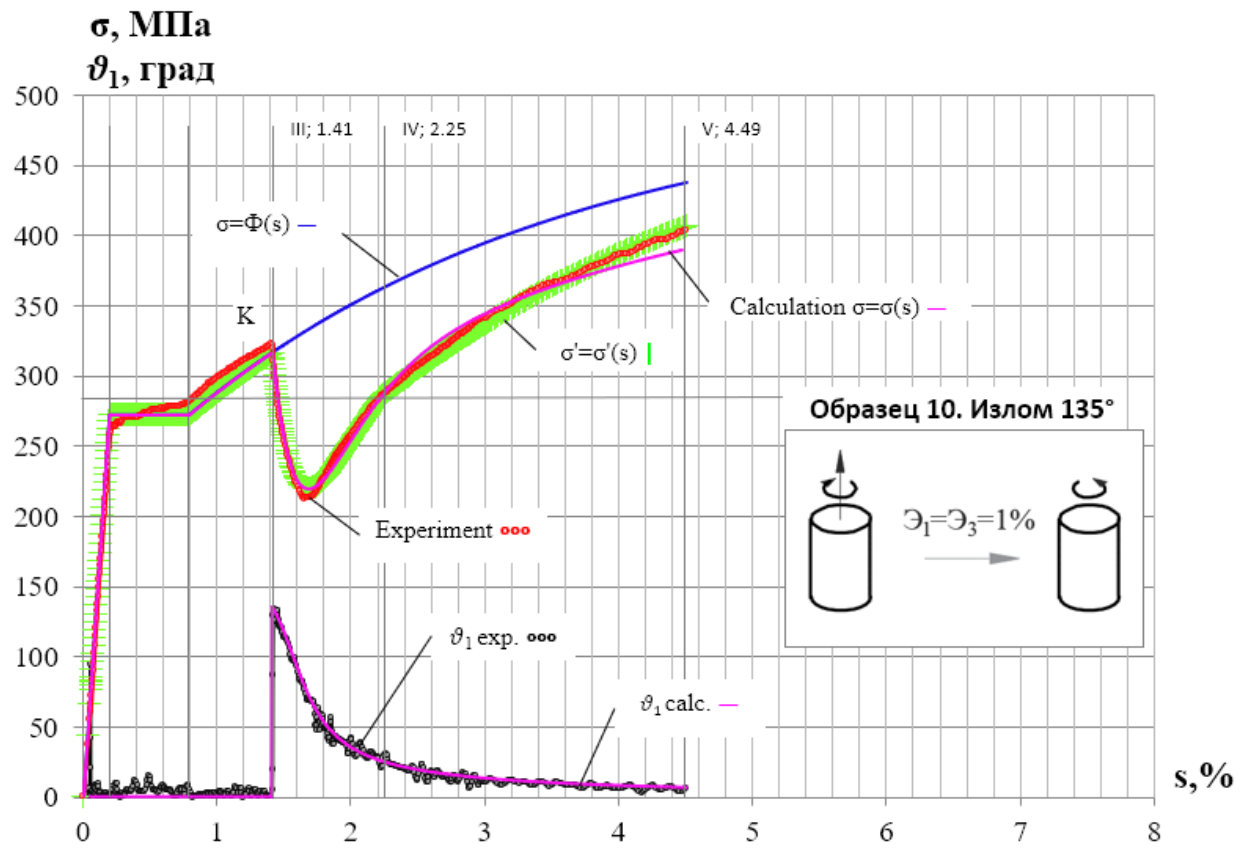
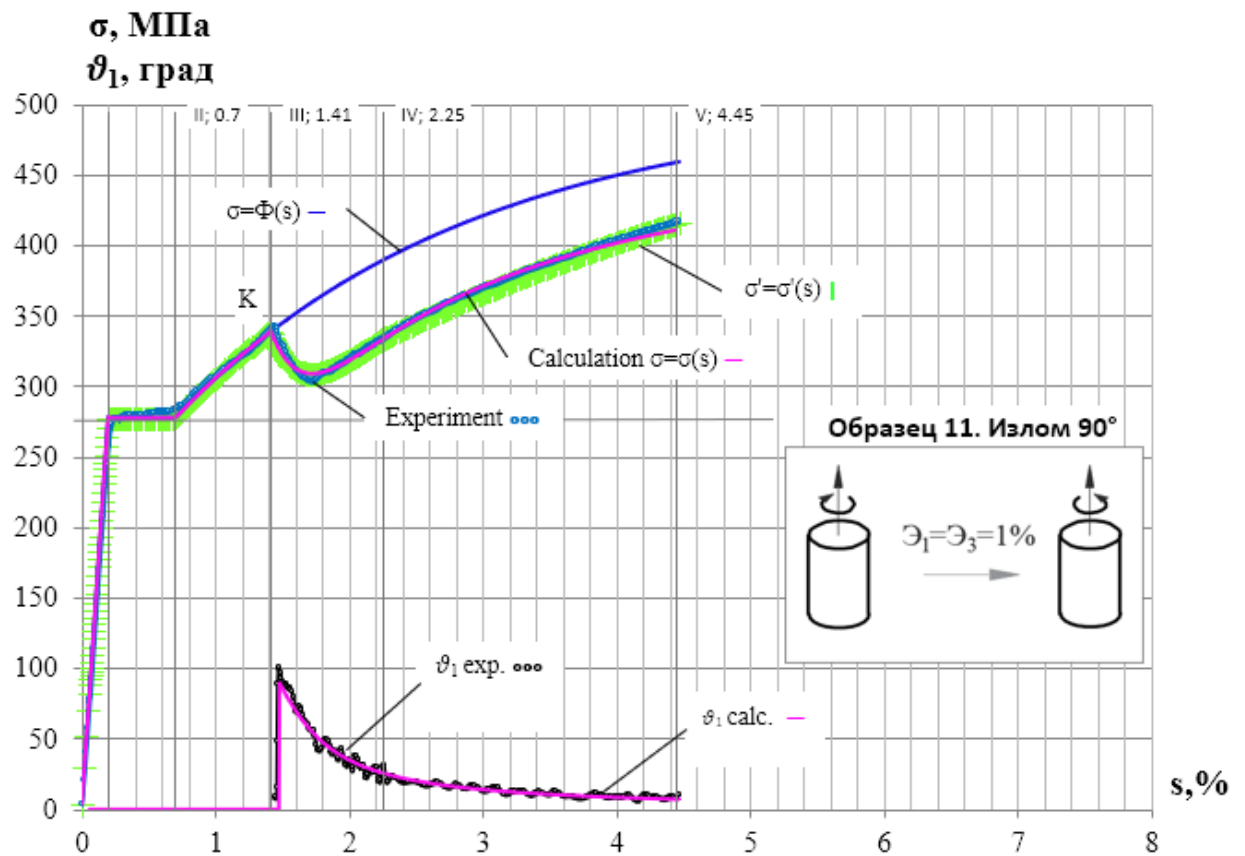
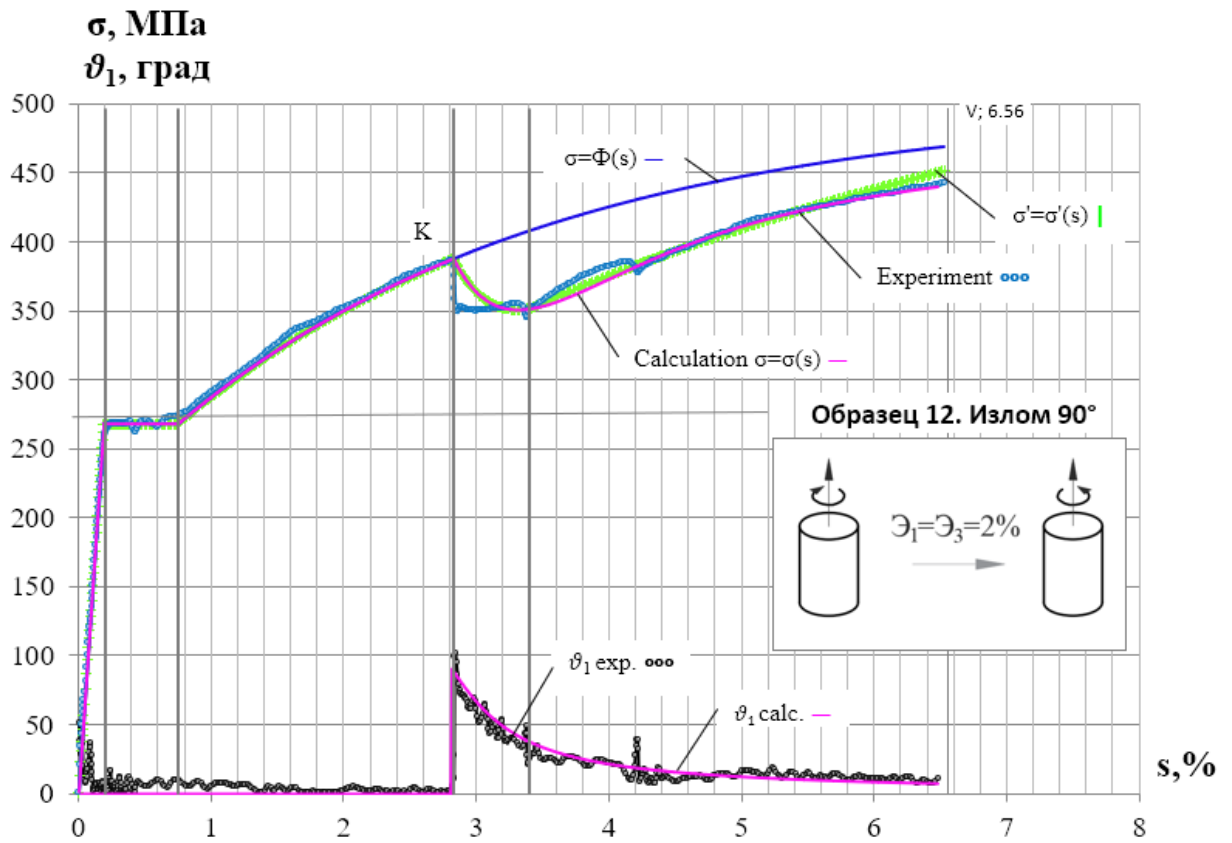
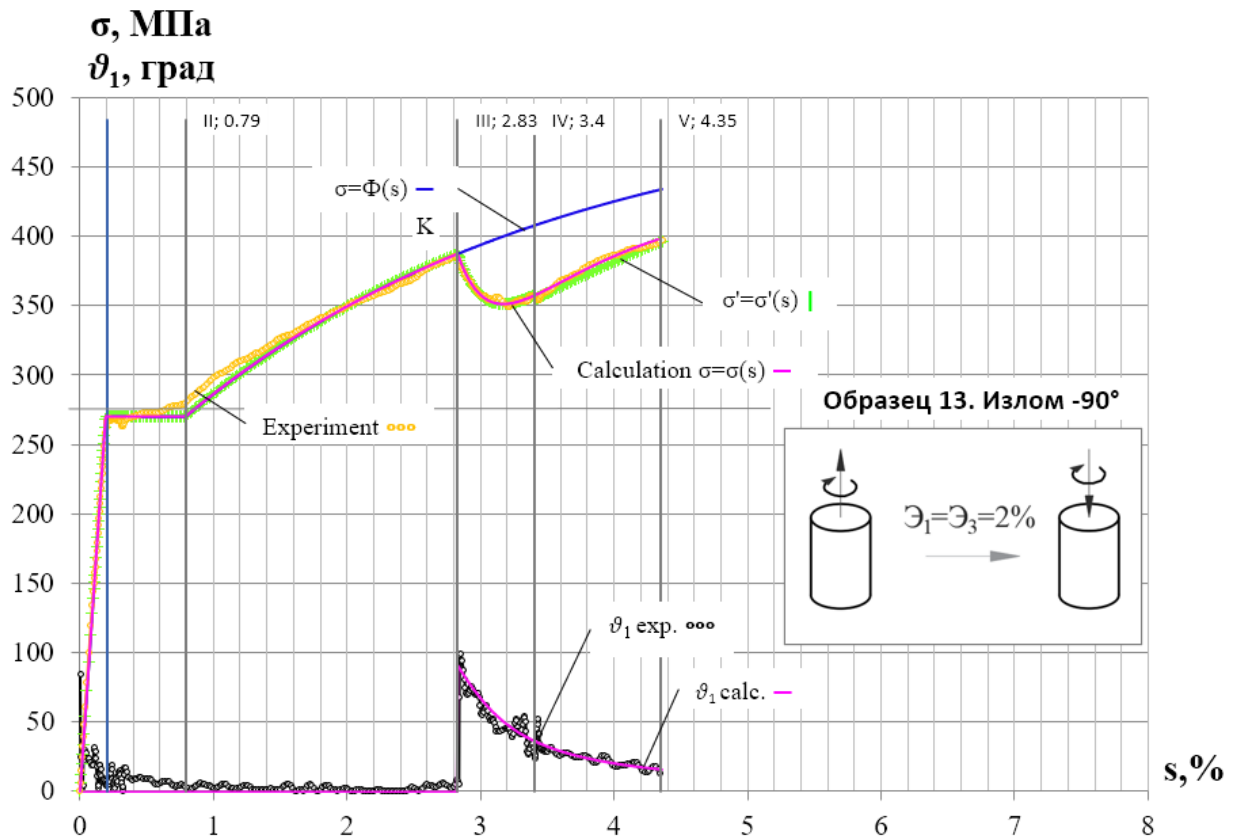
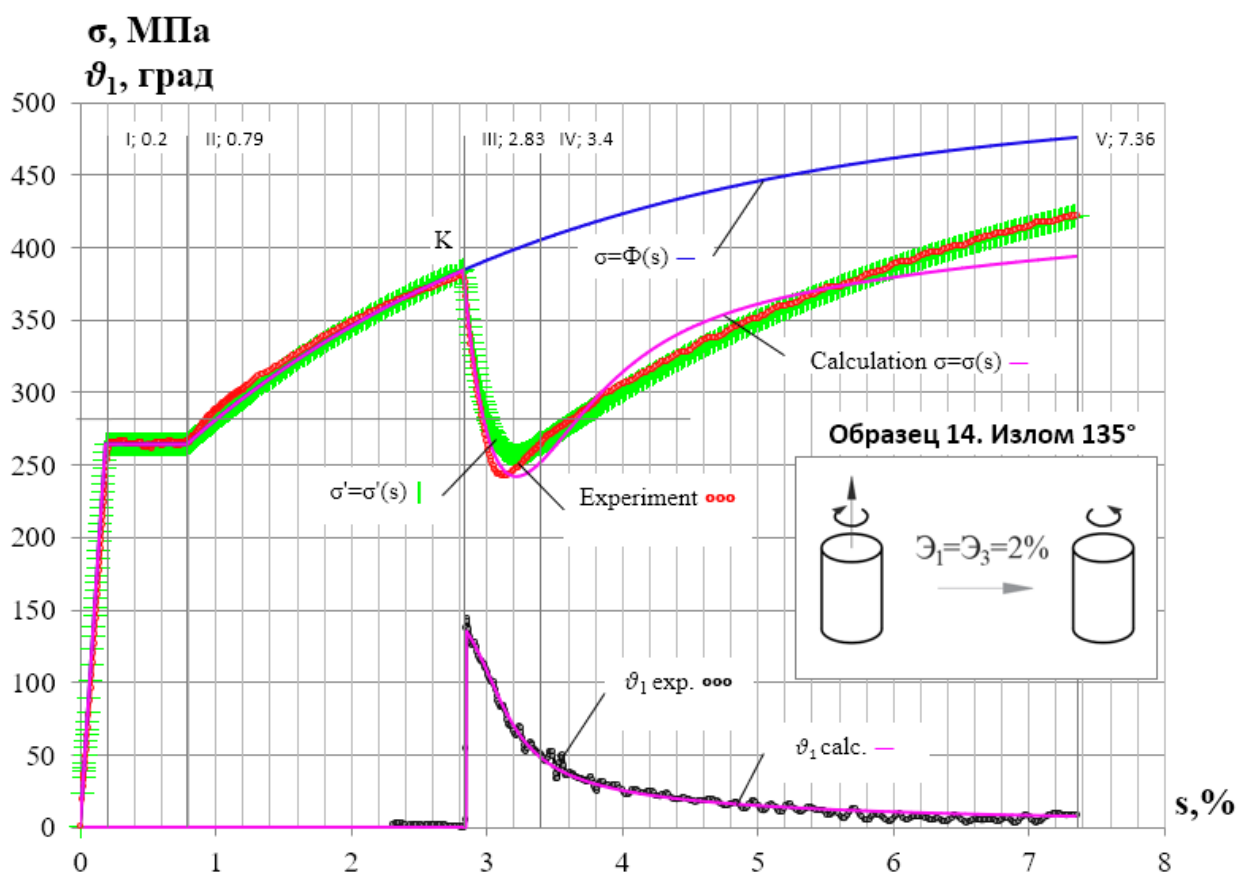
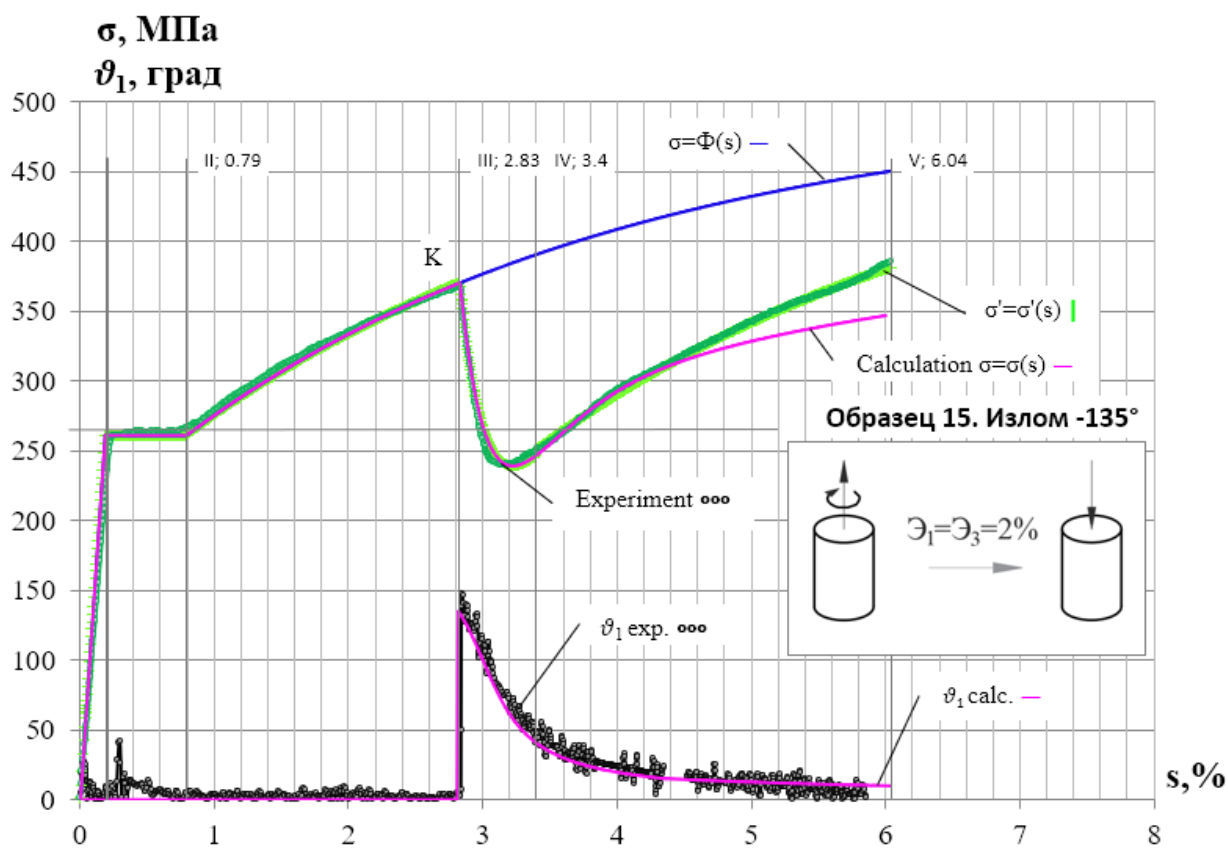


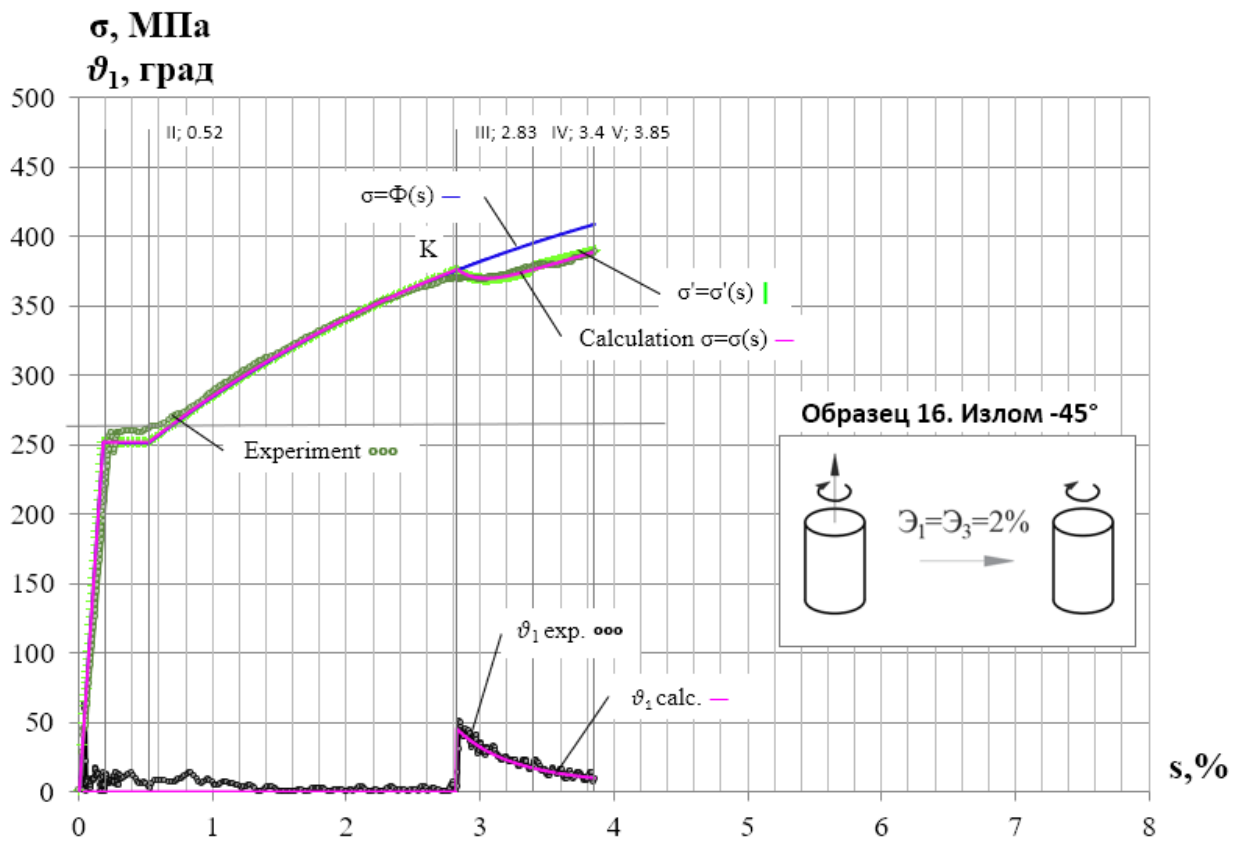
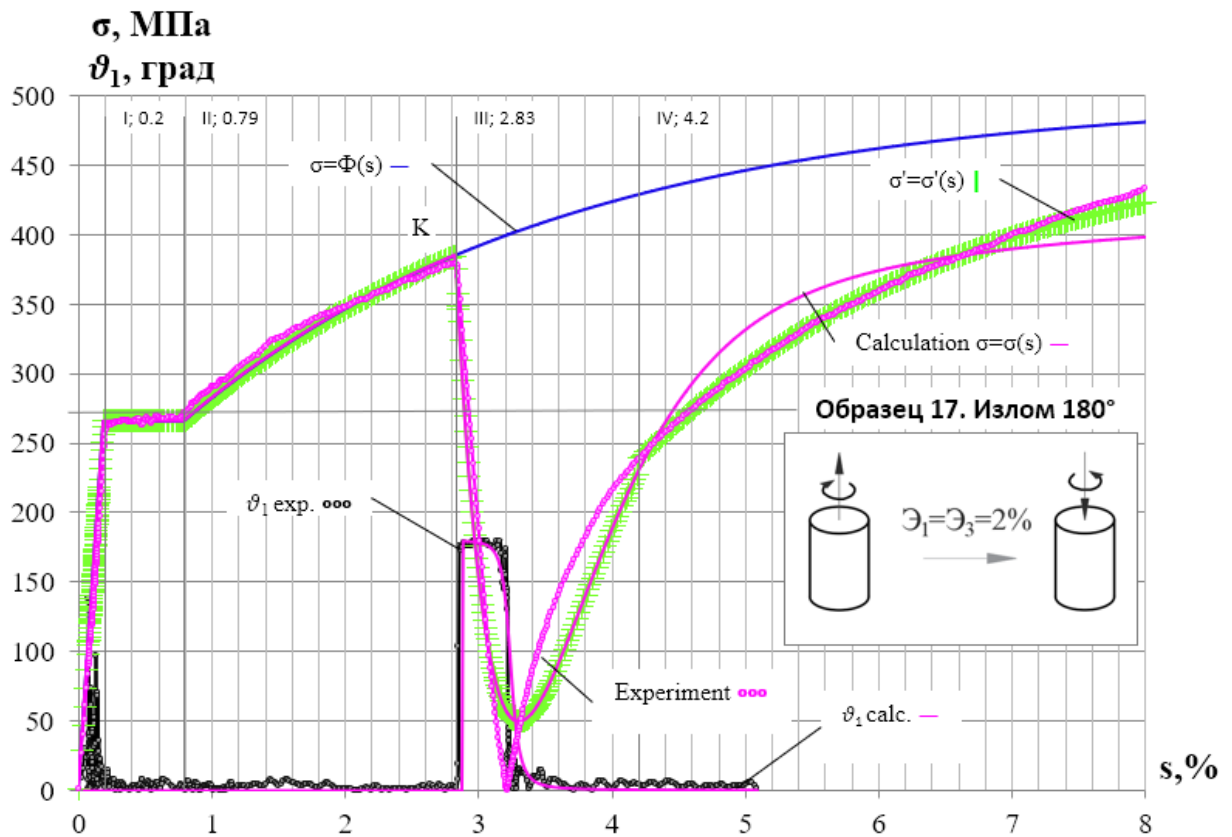
Рисунок 5.20 – Совмещённые диаграммы $\sigma - \text{и} \vartheta_1 - s$ (образец 7)

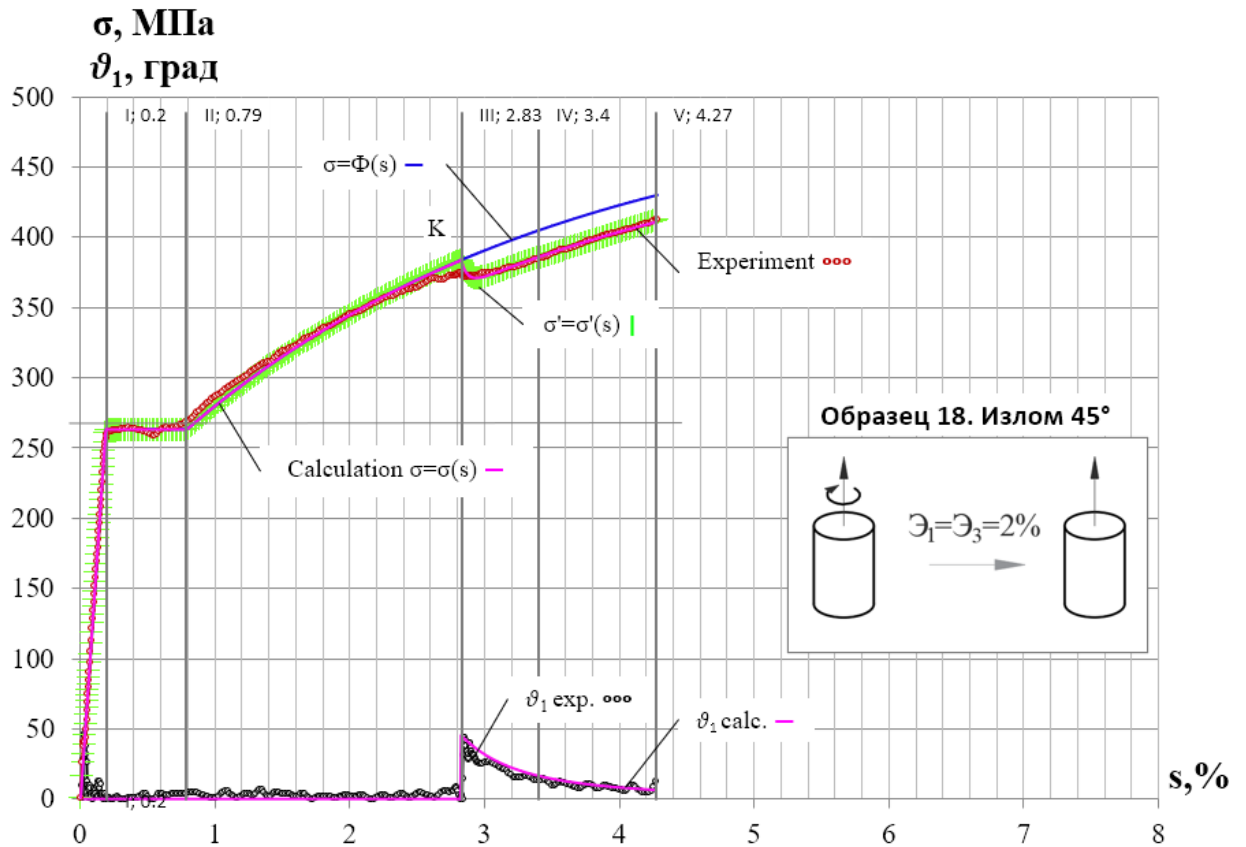
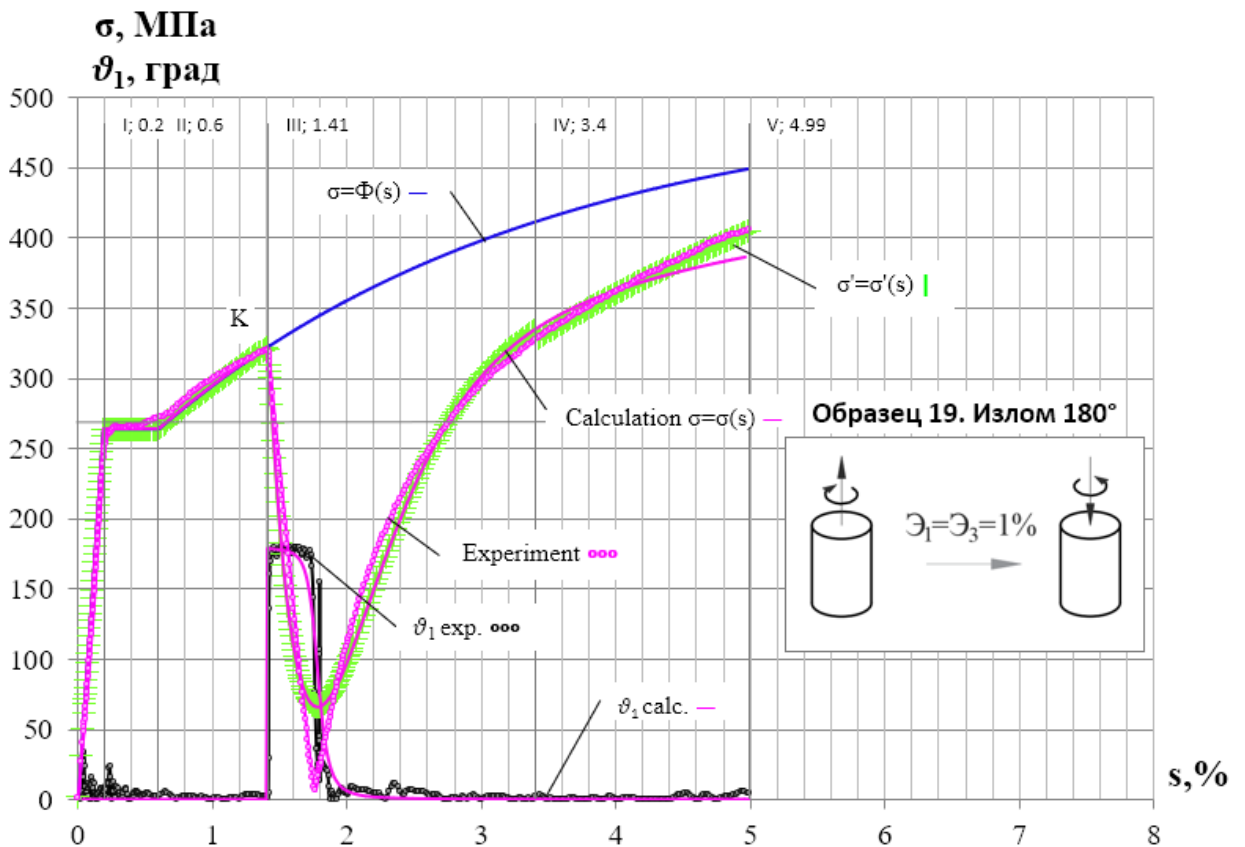
Рисунок 5.21 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 8)Рисунок 5.22 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 9)

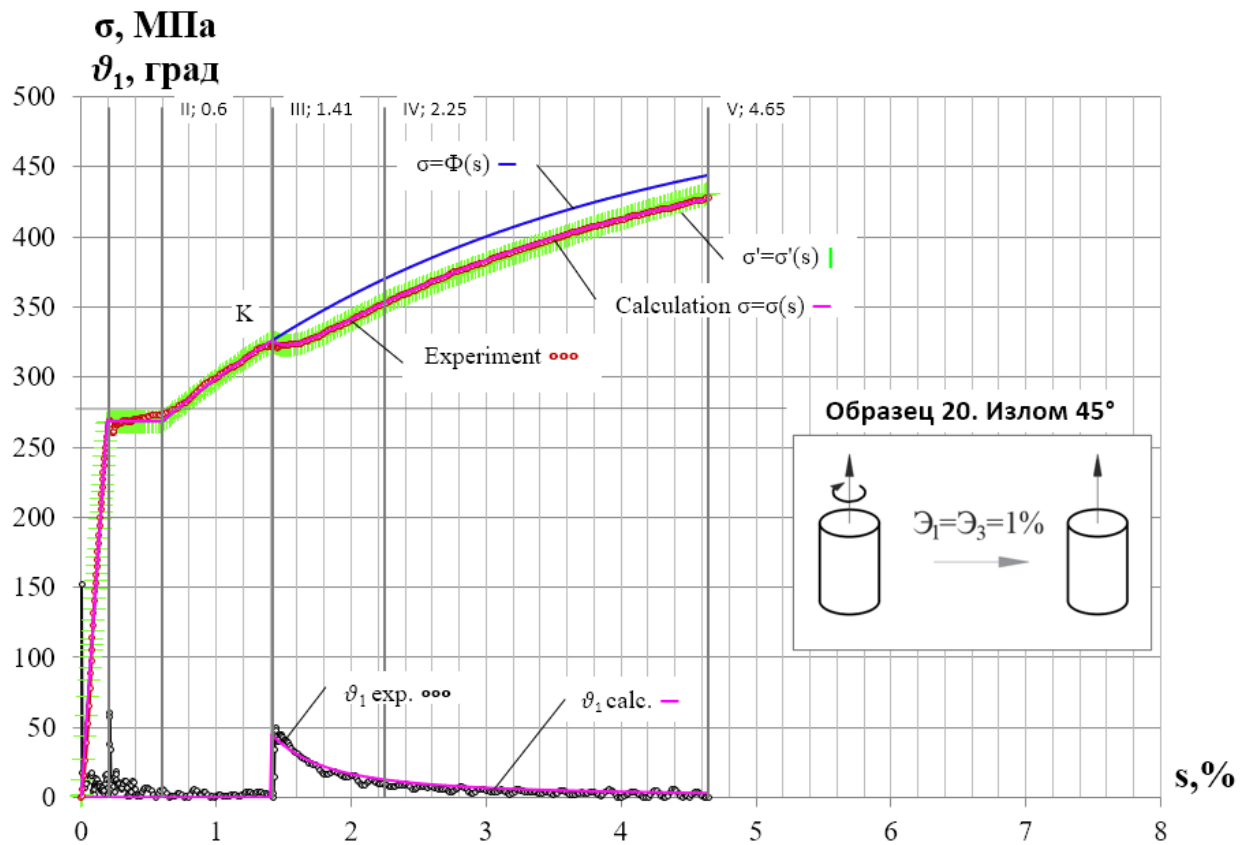
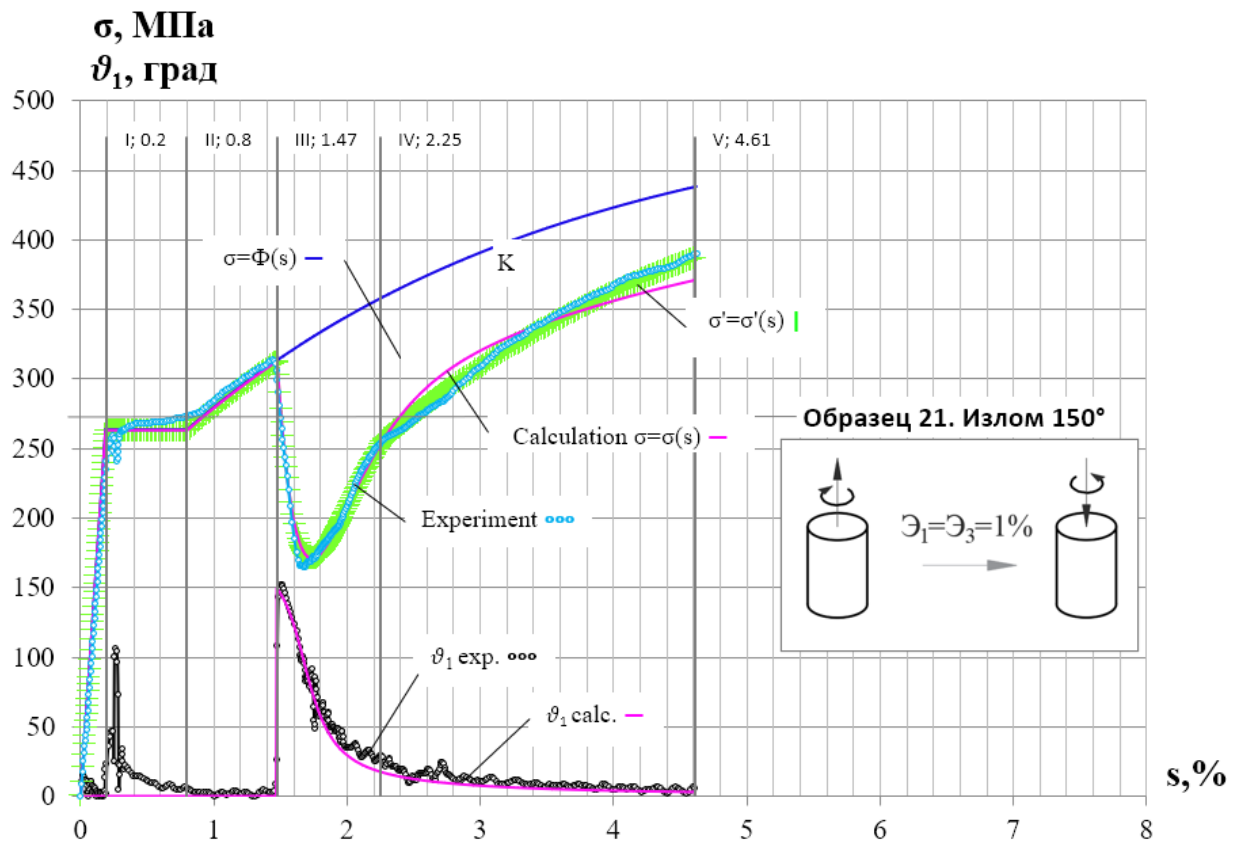
Рисунок 5.23 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 10)Рисунок 5.24 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 11)

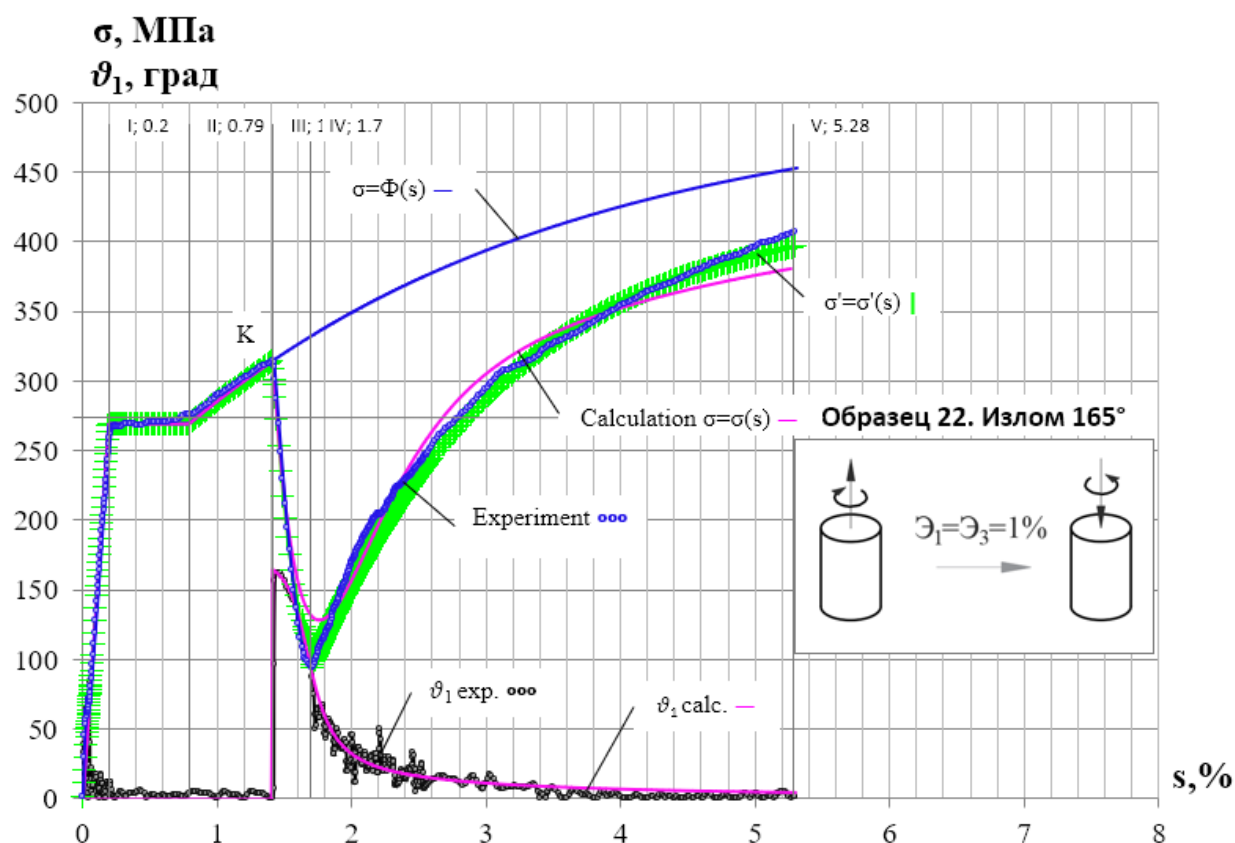
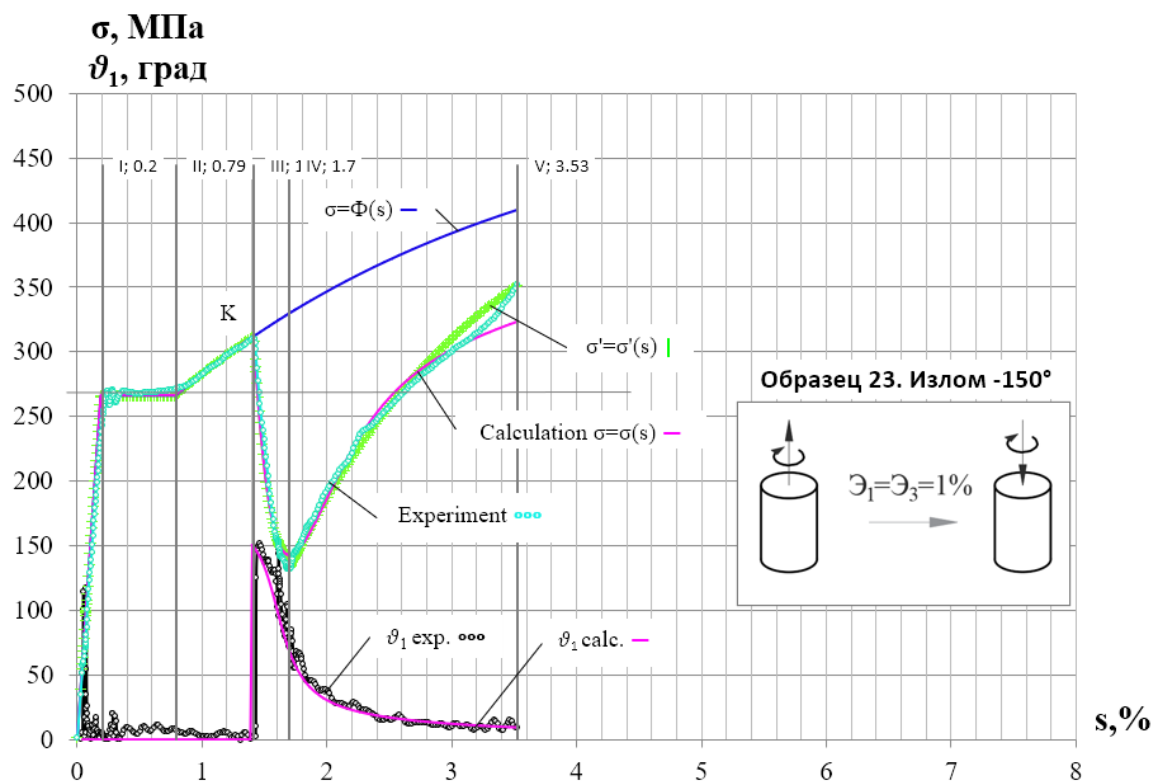
Рисунок 5.25 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 12)Рисунок 5.26 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 13)

Рисунок 5.27 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 14)Рисунок 5.28 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 15)

Рисунок 5.29 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 16)Рисунок 5.30 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 17)

Рисунок 5.31 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 18)Рисунок 5.32 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 19)

Рисунок 5.33 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 20)Рисунок 5.34 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 21)

Рисунок 5.35 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 22)Рисунок 5.36 – Совмещённые диаграммы $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образец 23)

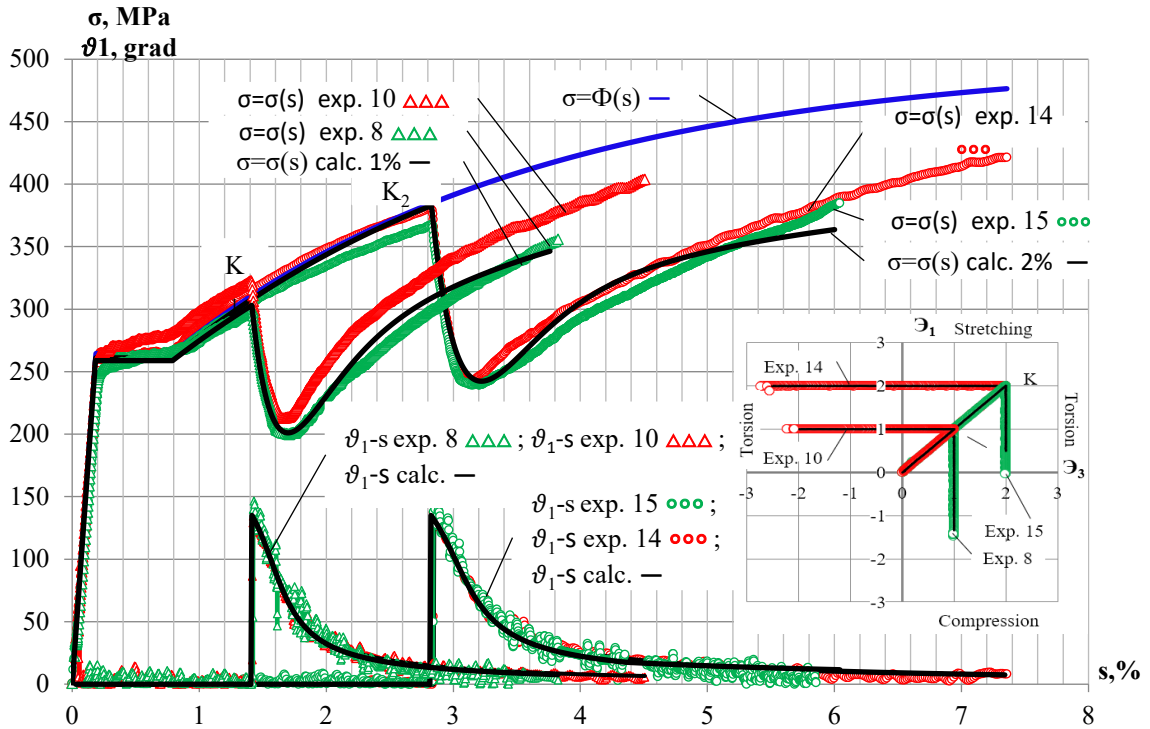


Рисунок 5.37 – Сравнение диаграмм $\sigma - s$ и $\vartheta_1 - s$ (образцы 8,10,14,15)

Видно, что введение дополнительного V участка позволяет значительно повысить точность аппроксимации.

Для наглядности на рисунке 5.38 представлены геометрические условия пластичности – эллипс Губера – Мизеса и шестигранник Треска – Сен-Венана. Пределы текучести на растяжения и сжатие приняты $\sigma_T = \sigma^T / \sqrt{2/3} = 324,7 \pm 3,5$ МПа. Внутренняя область включает напряженные состояния, которые в элементе тела вызывают лишь изменение упругих деформаций, внешняя область соответствует зоне возникновения дополнительных пластических деформаций.

Значения главных напряжений определялись по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2}, \quad (5.12)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2}.$$

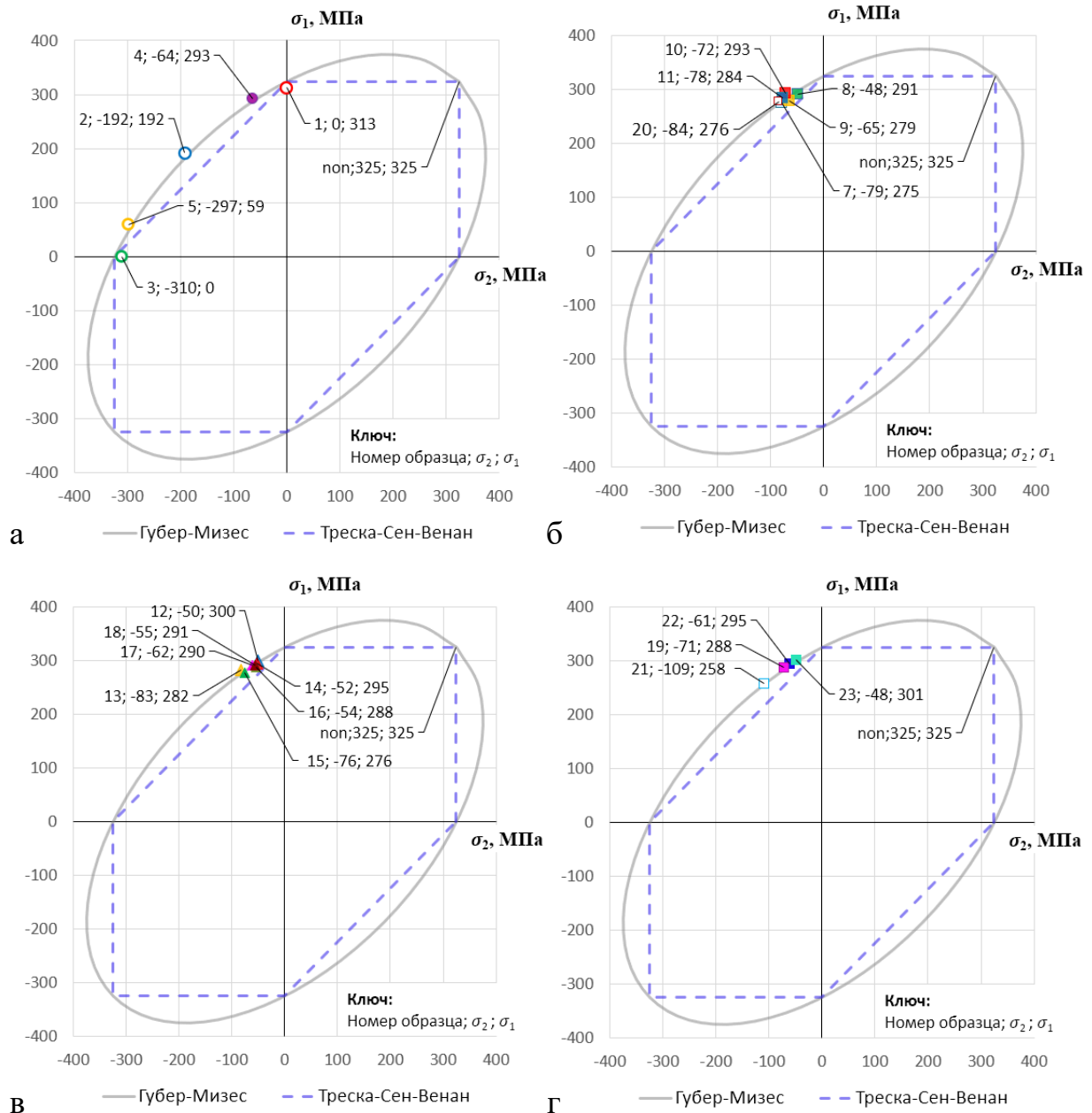


Рисунок 5.38 – Геометрические условия пластичности: центральный веер (а); веер 1 % (б); веер 2 % (в); большие углы излома (г)

Экспериментальные точки начала текучести легли вблизи эллипса, что показывает хорошее согласование условия пластичности Мизеса с данными опыта. Часть точек смещены в зону между кривыми, что согласуется с опытами [29, 34, 39]. Отмеченное отклонение можно объяснить неоднородностью материала и некоторыми погрешностями опыта.

5.3. Определение длины следов запаздывания скалярных и векторных свойств

Для определения длины следов запаздывания скалярных λ и векторных η свойств при статистической обработке данных были выбраны значения модуля вектора напряжений σ , модуля вектора деформаций ε , углов сближения ϑ_1 с шагом длины дуги траектории $s = 0,05$. Для учета разброса значений модуля вектора напряжений σ рассчитывалась величина δ по формуле [14, 126]:

$$\delta = \frac{S_\sigma}{\bar{\sigma}\sqrt{n}} \cdot t_{\alpha,f} \cdot 100 \% , \quad (5.13)$$

где S_σ – исправленное выборочное среднеквадратичное отклонение случайной величины σ в выборке объемом n ; $t_{\alpha,f}$ – квантиль распределения Стьюдента уровня α с числом степеней свободы f .

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}} , \quad (5.14)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее арифметическое значение.

Принятая доверительная вероятность $P = 0,95$ соответствует уровню значимости $\alpha = 0,05$, число степеней свободы определялось по формуле $f = n - 1$. Аналогично проводился учет разброса значений для углов сближения.

На рисунке 5.39 приведены диаграммы деформирования $\sigma(s)$ с изломом траекторий при $s = \sqrt{2}$, на рисунке 5.40 – при $s = \sqrt{8}$. В качестве критерия исчерпания следа скалярных свойств была принята величина s , при которой достигалось значение модуля вектора напряжений, равное значению в точке излома K .

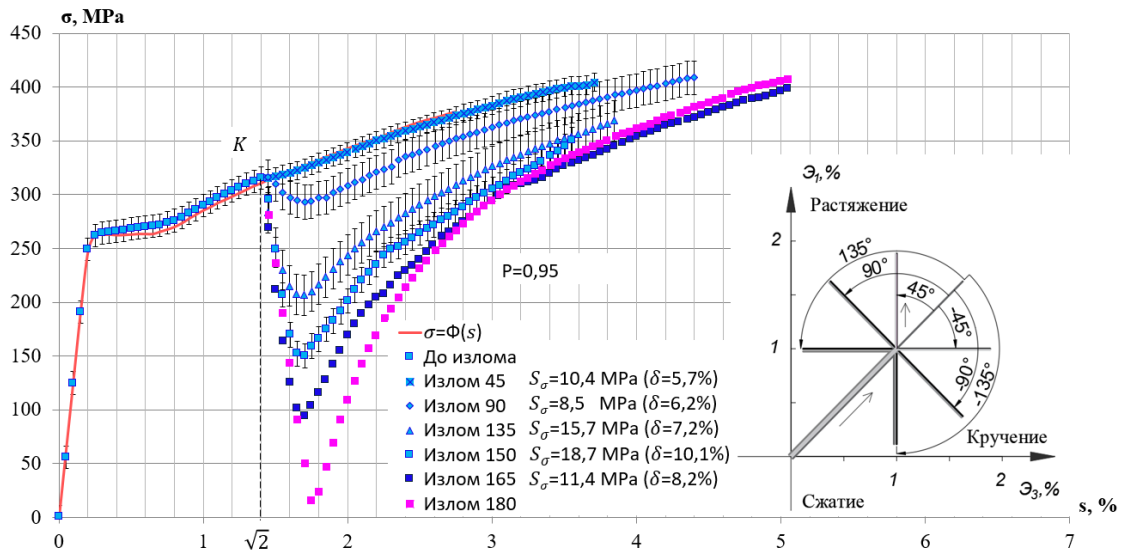


Рисунок 5.39 – Диаграммы деформирования при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1\%$

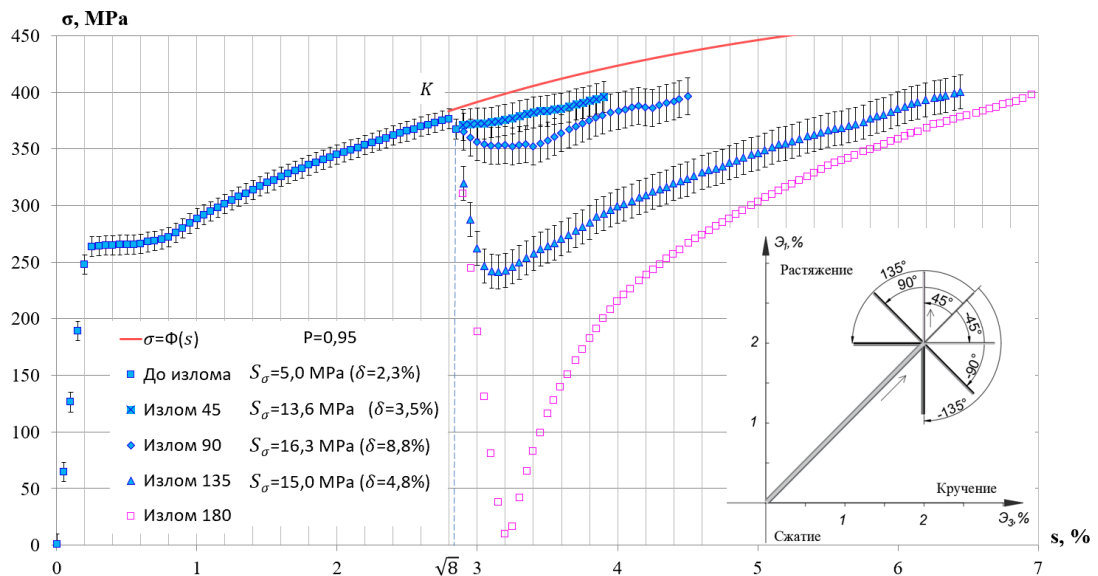


Рисунок 5.40 – Диаграммы деформирования при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2\%$

При изломе 1 % величина $\sigma_K = 315,4 \pm 7,1$ МПа, при изломе 2 % $\sigma_K = 367,4 \pm 7,5$ МПа. Величина модуля вектора напряжения, соответствующая вторичному пределу текучести В.Г. Зубчанинова, $\sigma = 361,6 \pm 18,3$ МПа.

Предположение о наличии общей точки пересечения K_0 для траекторий с разными углами излома в опытах не подтвердилось. Значение длины следа запаздывания скалярных свойств λ , при котором модуль вектора напряжений

σ достигает своего значения в начальной точке излома траектории K , увеличивается с увеличением угла излома. При углах излома траектории 45° запаздывание скалярных свойств на диаграмме деформирования $\sigma(s)$ практически отсутствует и находится в пределах от 0 до 0,4 %, при углах излома 90° изменяется от 0,6 до 1 %. При углах излома более 135° длина этого отрезка в первом случае при начальном деформировании $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3 = 1\%$ находится в пределах от 1,4 до 1,9 % (рисунок 5.39), во втором случае, при $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3 = 2\%$, – от 3 до 3,6 % (рисунок 5.40).

На рисунке 5.41 приведены диаграммы угла сближения $\vartheta_1 - s$ с изломом траектории при $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3 = 1\%$, на рисунке 5.42 – при $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3 = 2\%$, на рисунке 5.43 – для больших углов излома. Серыми вертикальными линиями показаны величины η для углов излома $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ и 180° , при которых происходит исчерпание следа запаздывания. Длина следа запаздывания векторных свойств определялась с использованием диаграммы зависимости угла сближения от длины дуги траектории. След запаздывания векторных свойств считался исчерпанным при достижении углом сближения значения $\nu_\eta = 0,1 \text{ рад} = 6^\circ$. Красными линиями выделены значения, при которых след запаздывания не был исчерпан из-за потери устойчивости одним из образцов, после чего график обрывался. Величина δ составляла порядка 5–10 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

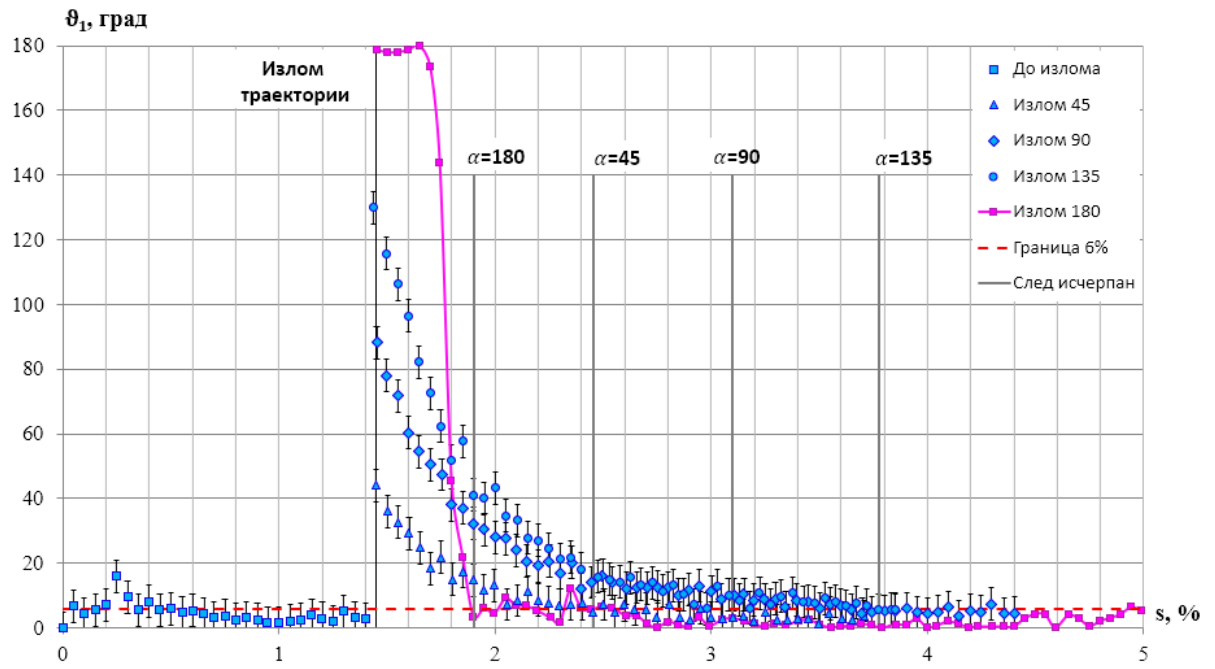


Рисунок 5.41 – След запаздывания векторных свойств,
излом при $\alpha_1 = \alpha_3 = 1 \%$

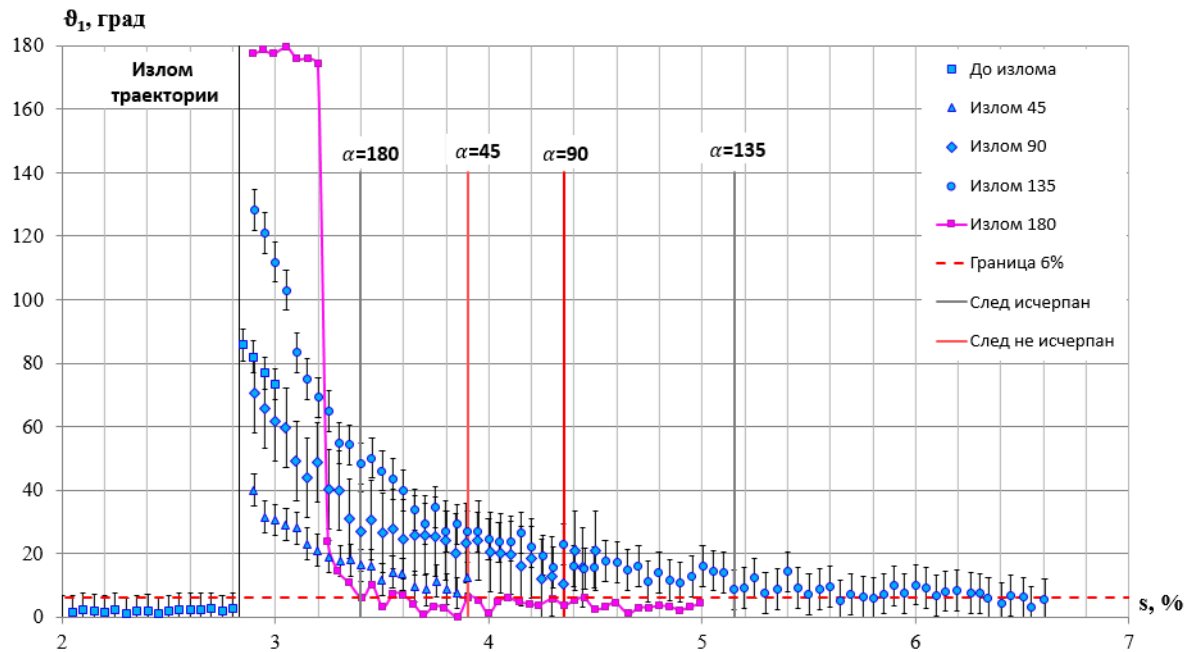


Рисунок 5.42 – След запаздывания векторных свойств,
излом при $\alpha_1 = \alpha_3 = 2 \%$

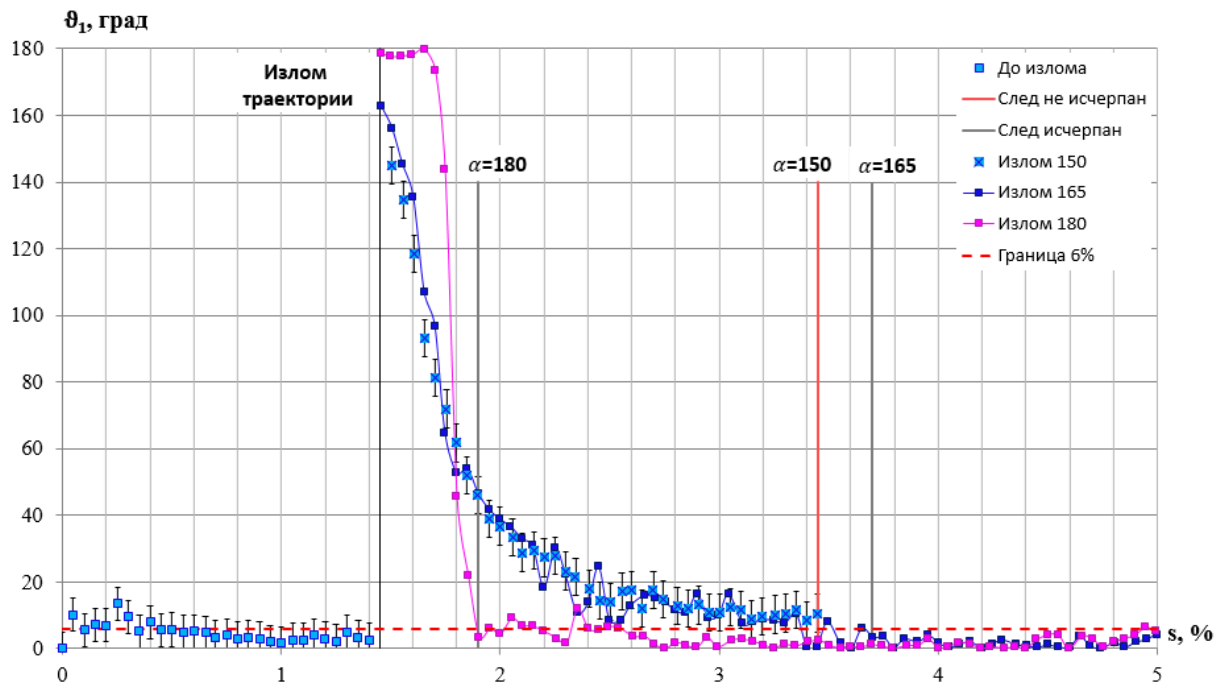


Рисунок 5.43 – Определение следа запаздывания скалярных свойств для больших углов излома траектории при $\Xi_1 = \Xi_3 = 1\%$

На рисунке 5.44 приведено сравнение длин следов запаздывания скалярных λ (рисунок 5.44а) и векторных η свойств (рисунок 5.44б).

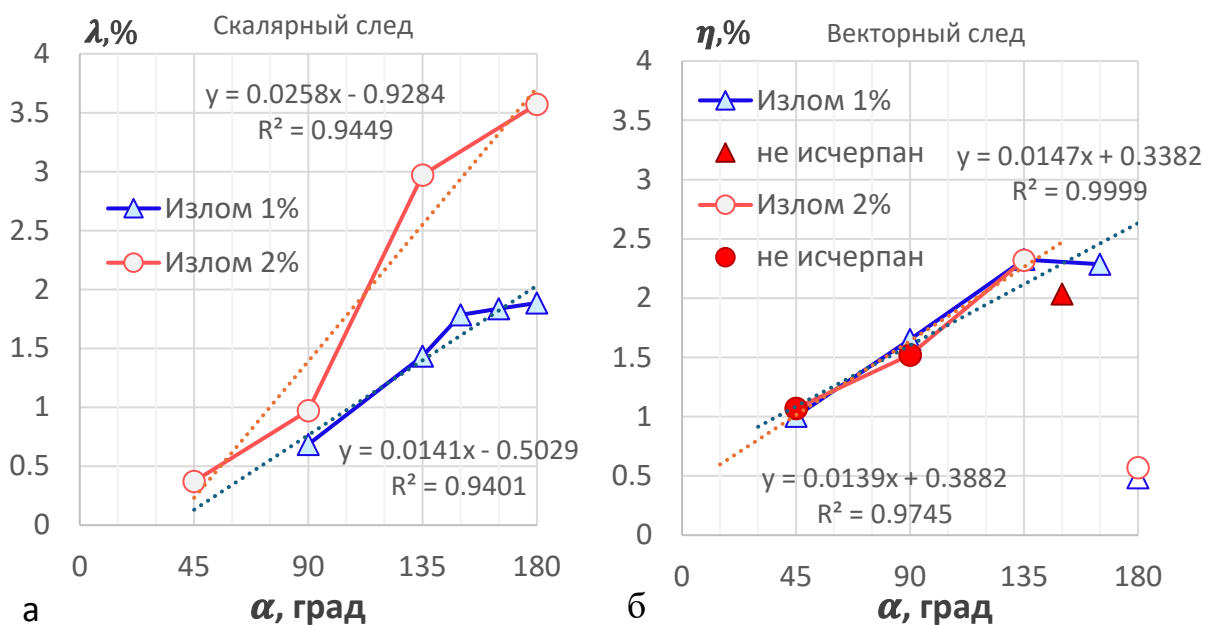


Рисунок 5.44 – Сравнение длин следов запаздывания скалярных λ (а) и векторных η (б) свойств

Видно, что между значением длины векторного следа η и углом излома траектории α , при углах излома траектории α до 135° , имеется линейная зависимость. Похожая зависимость обнаружена между значением длины скалярного следа λ , соответствующим выходу модуля вектора напряжений в точке K_0 после излома на величину в начале излома K , и углом излома траектории α . Увеличение 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.

5.4. Изучение функционалов пластичности

При простом нагружении напряженное состояние оболочек можно считать безмоментным [44], а для описания процесса использовать определяющие соотношения теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\Xi} \bar{\Xi} \quad (\hat{\sigma} = \hat{\Xi}), \quad (5.15)$$

где $\sigma = \Phi(\Xi)$ – универсальная функция простого нагружения.

Примером квазипростого процесса может служить явление бифуркации, при котором возникает бесконечно близкая моментная форма равновесия. Другими словами, процесс деформирования становится сложным с углом сближения $\vartheta_1 = \theta$ ($\cos\theta = \hat{p}_1 \cdot \hat{\Xi}$). Для этого бесконечно малого продолжения процесса А.А. Ильюшин предложил определяющие соотношения вида:

$$d\bar{\sigma} = Nd\bar{\Xi} + (P - N) \cos\theta \hat{\sigma} ds, \quad (5.16)$$

$$N = \frac{\sigma}{\Xi} = 2G_p, \quad P = \frac{d\sigma}{d\Xi} = 2G_k,$$

где N, P – функционалы пластичности; $2G_p, 2G_k$ – пластический (секущий) и касательный модули сдвига соответственно.

По Ильюшину, для аппроксимации функционалов могут быть использованы кусочно-постоянные функции с разрывами при $\vartheta_1 = \pi/2$, так что при $\vartheta_1 \leq \pi/2$ $N = 2G_p$, $P = 2G_k$, $d\sigma/ds = 2G_k$, а при $\vartheta_1 > \pi/2$ $N = 2G$, $P = 2G$, $d\sigma/ds = 2G_k$.

Однако экспериментальные исследования сложного упругопластического нагружения показывают, что функционалы изменяются непрерывно, поэтому в теории квазипростых процессов В.Г. Зубчаниновым было предложено для построения определяющих соотношений и аппроксимации функционалов использовать выражения [43, 108]:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{ds} = N \frac{d\bar{\varepsilon}}{ds} + (P - N) \frac{\bar{\sigma} \cdot \frac{d\bar{\varepsilon}}{ds}}{\sigma^2} \bar{\sigma}, \quad (5.17)$$

$$N = M_1 = 2G_p + (2G - 2G_p^0) \left(\frac{1 - \cos\vartheta_1}{2} \right)^q,$$

$$P = \frac{d\sigma}{ds} \frac{1}{\cos\vartheta_1}, \text{ или } \frac{d\sigma}{ds} = P \cos\vartheta_1 = 2G_k - (2G + 2G_k^0) \left(\frac{1 - \cos\vartheta_1}{2} \right)^p,$$

где q, p – экспериментальные подбираемые параметры; $2G_p$, $2G_k$ – удвоенный пластический и касательные модули сдвига; $2G_p^0$, $2G_k^0$ – то же в точке излома траектории.

Экспериментальные значения могут быть найдены из известных выражений, например [108]:

$$N = \frac{S_1 \frac{dS_3}{ds} - S_3 \frac{dS_1}{ds}}{S_1 \frac{d\varepsilon_3}{ds} - S_3 \frac{d\varepsilon_1}{ds}}; \quad P = \frac{S_1 \frac{dS_1}{ds} + S_3 \frac{dS_3}{ds}}{S_1 \frac{d\varepsilon_1}{ds} + S_3 \frac{d\varepsilon_3}{ds}}; \quad \frac{d\sigma}{ds} = \frac{S_1 \frac{dS_1}{ds} + S_3 \frac{dS_3}{ds}}{\sigma}, \quad (5.18)$$

где S_i, ε_i ($i = 1, 2, 3$) – компоненты векторов напряжений и деформаций;

σ, ε – модули векторов напряжений и деформаций;

s – длина дуги траектории деформирования.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов по определению функционалов пластичности N, P и $d\sigma/ds$ представлено на рисунках 5.45–5.48.

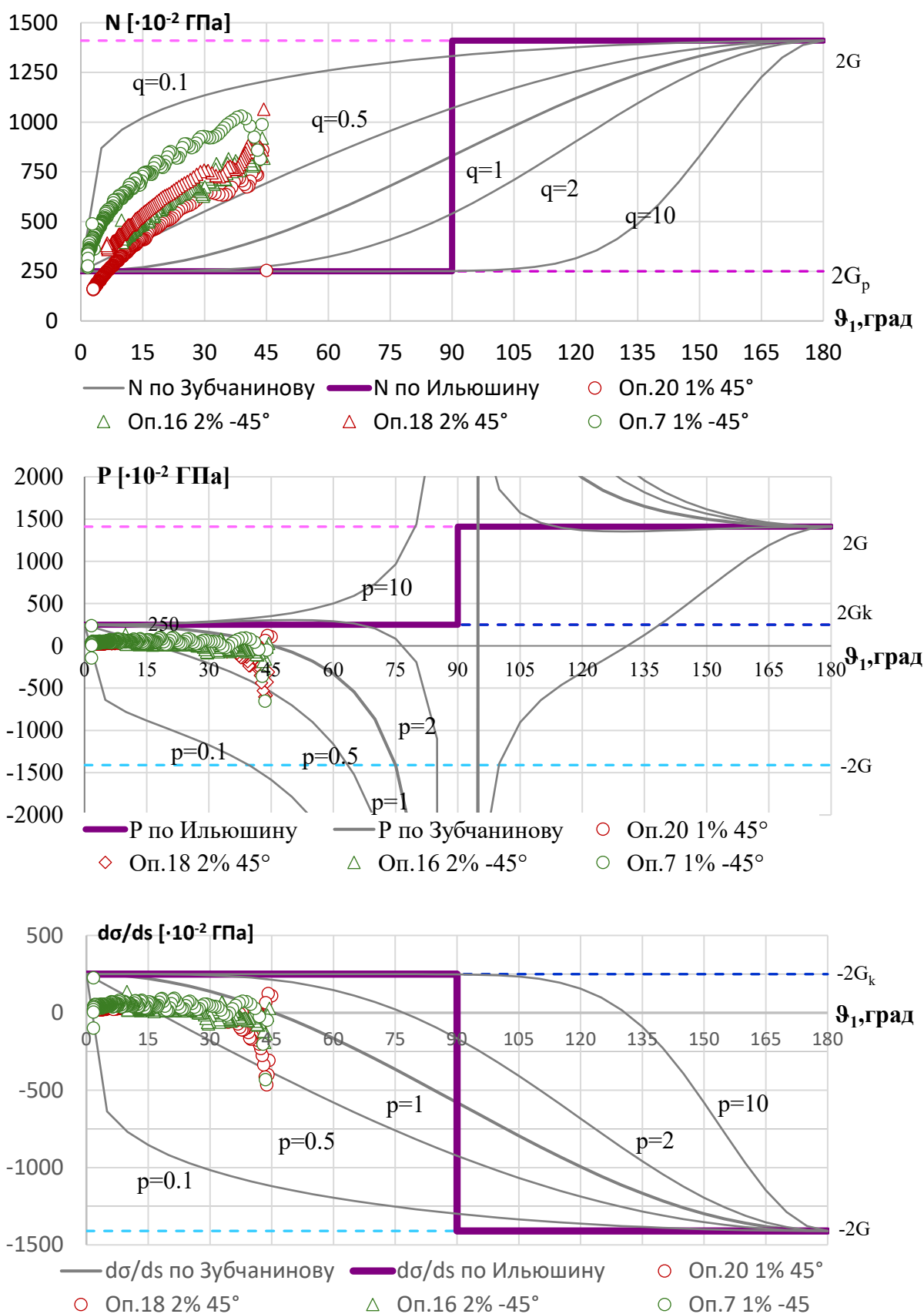


Рисунок 5.45 – Экспериментальные и теоретические значения функционалов N , P и $d\sigma/ds$ для траекторий с углом излома $\pm 45^\circ$

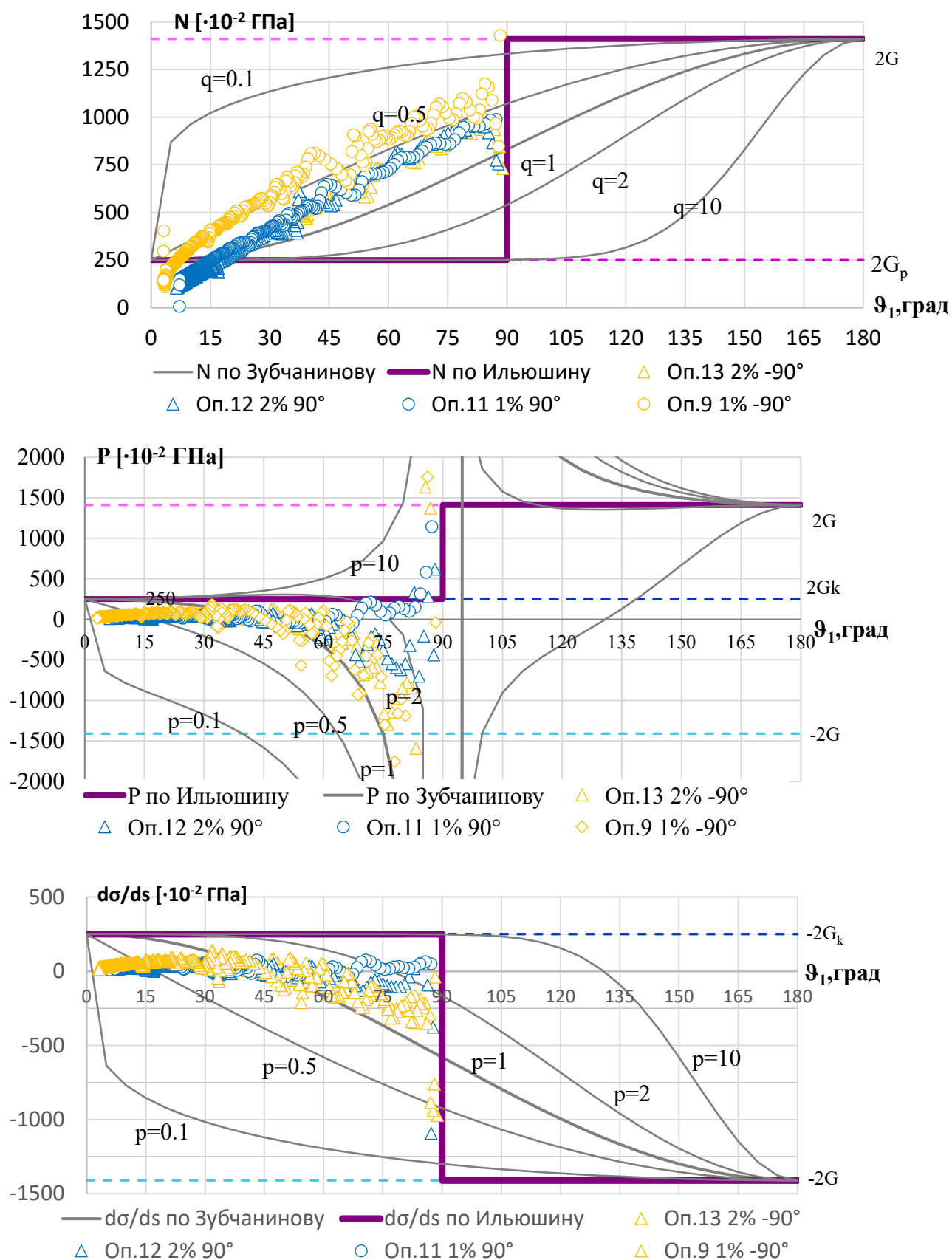


Рисунок 5.46 – Экспериментальные и теоретические значения функционалов N , P и $d\sigma/ds$ для траекторий с углом излома $\pm 90^\circ$

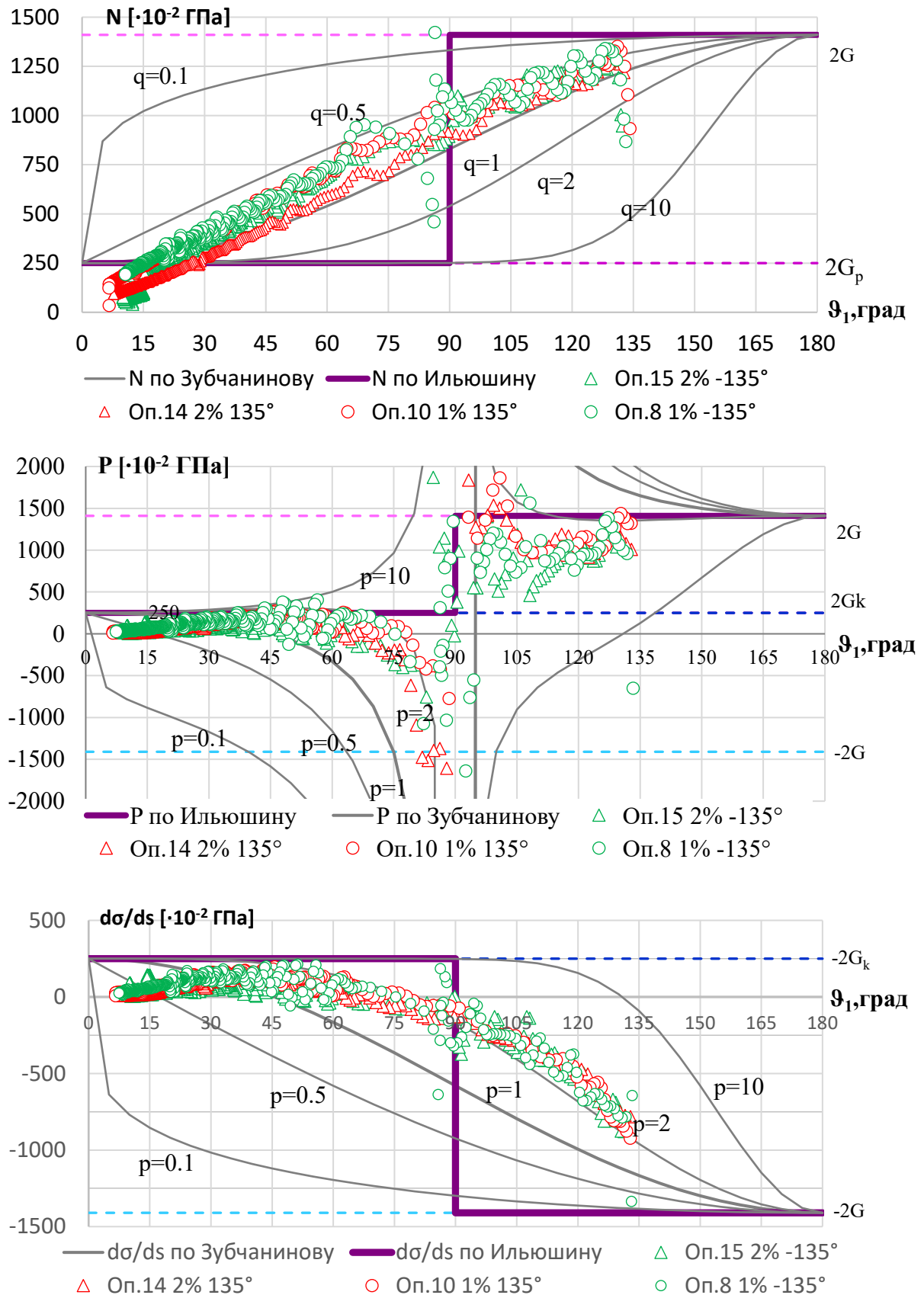


Рисунок 5.47 – Экспериментальные и теоретические значения функционалов N , P и $d\sigma/ds$ для траекторий с углом излома $\pm 135^\circ$

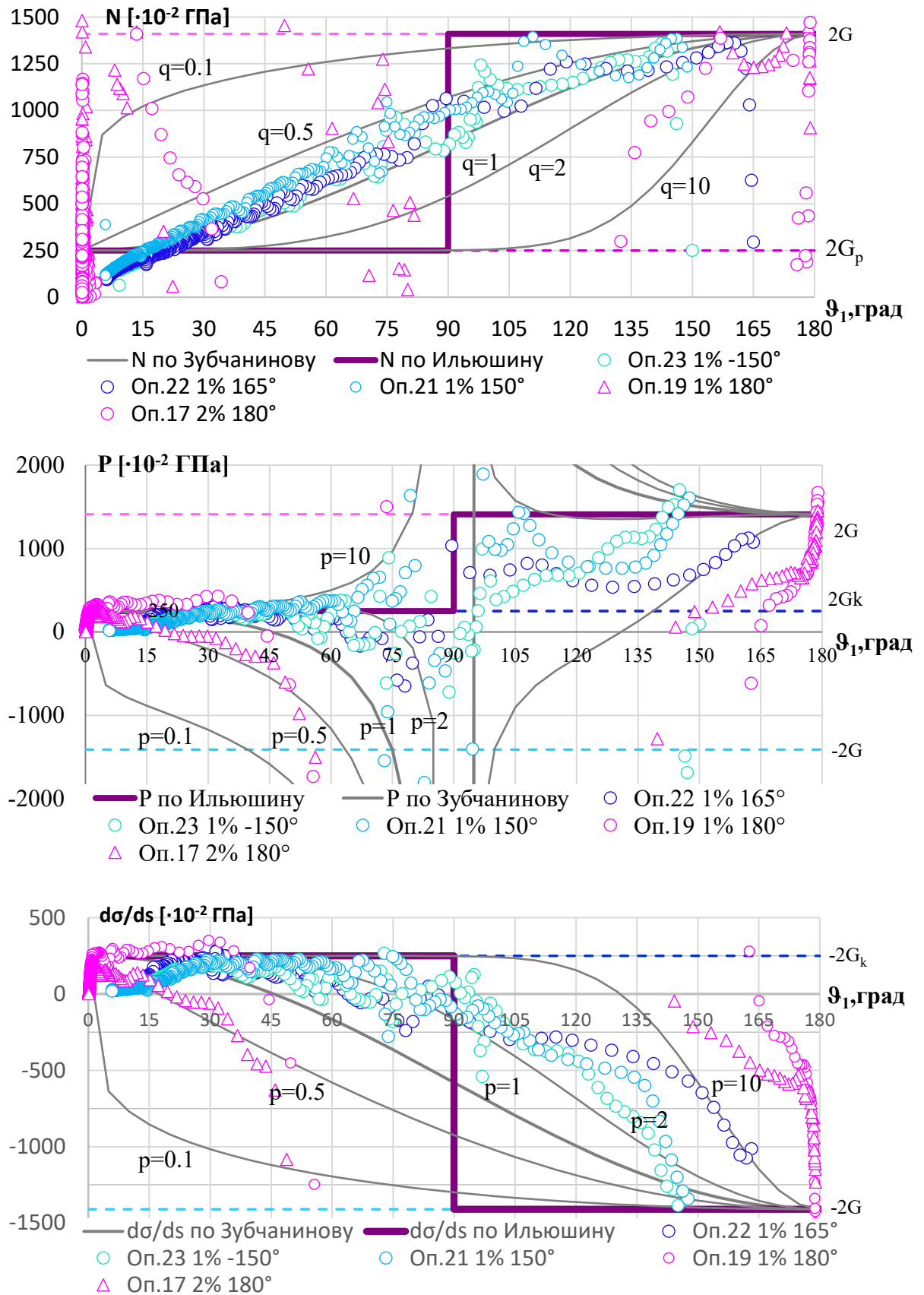


Рисунок 5.48 – Экспериментальные и теоретические значения функционалов N, P и $d\sigma/ds$ для траекторий с углом излома $\pm 150^\circ, 165^\circ$ и 180°

Таким образом, изучено влияние истории нагружения и явление запаздывания векторных и скалярных свойств материалов в теории упругопластических процессов. Результаты показали, что для данных траекторий функционалы могут с достаточной степенью точности быть аппроксимированы по соотношениям В.Г. Зубчанинова. При этом задача сводится к определению значений показателей степени p и q . Кроме того, важной задачей является учет скалярных и векторных свойств конструкционных материалов, а также изучение поведения функционалов при циклической нагрузке и в условиях, отличных от нормальных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 $\sigma(\vartheta)$ 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, А. А. Моделирование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по плоским траекториям / А. А. Алексеев, В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультяев // Упругость и неупругость : материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшина. — Москва, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Издательский Дом (типография), 2021. — С. 171–176.
2. Алексеев, А. А. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по некоторым многозвенным траекториям / А. А. Алексеев, В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультяев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2020. — № 3 (45). — С. 64–71.
3. Аннин, Б. Д. Групповые свойства уравнений упругости и пластичности / Б. Д. Аннин, В. О. Бытев, С. И. Сенашов ; отв. ред. В. В. Пухначев. — Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1985. — 142 с.
4. Аннин, Б. Д. Упругопластическая задача / Б. Д. Аннин, Г. П. Черепанов. — Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1983. — 238 с.
5. Бабамуратов, К. Ш. Метод СН-ЭВМ и его приложения к задачам теории пластичности / К. Ш. Бабамуратов, А. А. Ильюшин, В. К. Кабулов ; отв. ред. Т. Р. Рашидов ; АН УзССР. — Ташкент : Фан, 1987. — 288 с.
6. Барре де Сен-Венан, А.-Ж.-К. Мемуар о кручении призм ; Мемуар об изгибе призм / А.-Ж.-К. Барре де Сен-Венан ; пер. с фр.

А. А. Парийского ; под ред. и со вступ. статьей Г. Ю. Джанелидзе. — Москва : Физматгиз, 1961. — 518 с.

7. Батдорф, С. Б. Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения / С. Б. Батдорф, Б. Будянский // Механика : период. сб. переводов иностр. статей. — 1962. — № 1. — С. 135–155.

8. Бессон, Ж. Нелинейная механика материалов : перевод с французского / Ж. Бессон, Ж. Каето, Ж. Л. Шабош, С. Форест. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010. — 398 с. — ISBN 978-5-7422-2716-8.

9. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопровильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / В. Ю. Блюменштейн // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2017. — № 8(74). — С. 7–16.

10. Богатырев, И. С. Машина СН для исследования пластического деформирования металлов при сложном нагружении / И. С. Богатырев, А. А. Ильюшин, В. С. Ленский, В. М. Панферов // Инженерный журнал. — 1961. — № 2. — С. 182–193.

11. Бондарь, В. С. Неупругость. Варианты теорий / В. С. Бондарь. — Москва : Физматлит, 2004. — 144 с.

12. Бондарь, В. С. Пластичность : Пропорциональные и непропорциональные нагружения / В. С. Бондарь, В. В. Даншин. — Москва, 2008. — 176 с. — ISBN 978-5-9221-1025-9.

13. Бровко, Г. Л. Научное наследие А. А. Ильюшина и развитие его идей в механике / Г. Л. Бровко, Д. Л. Быков, Р. А. Васин [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2011. — № 1. — С. 5–18.

14. Булгаков, А. Н. Длина следов запаздывания скалярных и векторных свойств конструкционных материалов при деформировании по двухзвенным траекториям в виде смещенного веера / А. Н. Булгаков // Авиационные двигатели. — 2026. — № 1 (30). — С. 89–98.
15. Быковцев, Г. И. Теория пластичности / Г. И. Быковцев, Д. Д. Ивлев ; РАН, Дальневост. отд-ние, Ин-т автоматики и процессов управления. — Владивосток : Дальнаука, 1998. — 527 с.
16. Васин, Р. А. Об экспериментальном исследовании функционалов пластичности в теории упругопластических процессов / Р. А. Васин // Пластичность и разрушение твердых тел : сб. науч. тр. / АН СССР, Ин-т проблем механики ; отв. ред. Р. В. Гольдштейн. — Москва : Наука, 1988. — С. 40–57.
17. Васин, Р. А. Исследование определяющих соотношений и критериев разрушения на сплошных и толстостенных трубчатых цилиндрических образцах / Р. А. Васин, А. А. Ильюшин, П. А. Моссаковский // Известия РАН. Механика твердого тела. — 1994. — № 2. — С. 177–184.
18. Васин, Р. А. О "памяти" материала в теории упругопластических процессов / Р. А. Васин // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. — 2013. — № 2-2. — С. 59–70.
19. Галилей, Г. Избранные труды. В 2 т. Т. 2. Механика / Г. Галилей ; предисл. акад. А. Ю. Ишлинского ; Акад. наук СССР. — Москва : Наука, 1964. — 571 с.
20. Гараников, В. В. Исследование векторных и скалярных свойств при изменении направления процесса деформирования / В. В. Гараников // Фундаментальные основы механики. — 2018. — № 3. — С. 112–114.
21. Гараников, В. В. Исследование векторных свойств стали 12X18H10T на пространственных криволинейных траекториях / В. В.

Гараников // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2018. — № 8. — С. 53–55.

22. Гулятьев, В. И. Методика экспериментального исследования пластичности поликристаллических материалов на испытательном комплексе СН-ЭВМ / В. И. Гулятьев, В. Г. Зубчанинов, И. А. Саврасов, А. А. Алексеев // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела : материалы IX Международного научного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения В. Г. Зубчанинова, Тверь, 2021. — Тверь : ТвГТУ, 2021. — С. 34–36.

23. 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/chgpu.2023.56.2.006.

24. Гулятьев, В. И. Экспериментальное исследование материала сталь 45 при деформировании по программам смещённого всеера / 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/chgpu.2023.56.2.009.

25. 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/chgpu.2025.65.3.005.

26. Дегтярев, В. П. Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций / В. П. Дегтярев. — Москва : Машиностроение, 1967. — 131 с.
27. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор ; пер. с англ. А. Г. Овчинникова. — Москва : Машиностроение, 1979. — 567 с.
28. Друянов, Б. А. Теория технологической пластичности / Б. А. Друянов, Р. И. Непершин. — Москва : Машиностроение, 1990. — 271 с.
29. Жуков, А. М. Исследование пластических деформаций стали при сложном нагружении / А. М. Жуков, Ю. Н. Работнов // Инженерный сборник. — 1954. — Т. XVIII. — С. 105–112.
30. Жуков, А. М. Механические свойства сплава МА2 при двухосном растяжении / А. М. Жуков // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1957. — № 9. — С. 56–65.
31. Жуков, А. М. Некоторые особенности кривой нейтрального нагружения / А. М. Жуков // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1958. — № 8. — С. 32–40.
32. Жуков, А. М. Некоторые особенности поведения материалов при упругопластическом деформировании / А. М. Жуков // Вопросы теории пластичности. — Москва : Изд-во АН СССР, 1961. — С. 30–57.
33. Жуков, А. М. О коэффициенте Пуассона в пластической области / А. М. Жуков // Известия АН СССР. — 1954. — № 12. — С. 86–91.
34. Жуков, А. М. О пластических деформациях изотропного металла при сложном нагружении / А. М. Жуков // Известия АН СССР. — 1956. — № 12. — С. 72–87.
35. Жуков, А. М. Об условиях разрушения пластичных металлов при сложном напряженном состоянии / А. М. Жуков // Известия АН СССР. — 1958. — № 5. — С. 110–112.

36. Жуков, А. М. Пластические деформации стали при сложном нагружении / А. М. Жуков // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1954. — № 11. — С. 53–61.

37. Жуков, А. М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряжённом состоянии / А. М. Жуков // Инженерный сборник. — 1954. — Т. XX. — С. 37–48.

38. Жуков, А. М. Прочность и пластичность сплава Д16Т при сложном напряженном состоянии / А. М. Жуков // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1954. — № 6. — С. 61–70.

39. Жуков, А. М. Сложное нагружение в теории пластичности изотропных материалов / А. М. Жуков // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1955. — № 8. — С. 81–92.

40. Зубчанинов В.Г., Акимов А.В., Охлопков Н.Л. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сложном нагружении . патент на полезную модель RU 7202 U1, 16.07.1998. Заявка № 97108023/20 от 20.05.1997.

41. Зубчанинов, В. Г. Испытание конструкционных материалов по пространственным винтовым траекториям / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев, С. Л. Субботин, В. В. Гараников // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 3, № 3. — С. 50–52.

42. Зубчанинов, В. Г. Математическая теория пластичности / В. Г. Зубчанинов. — Тверь : ТГТУ, 2002. — 300 с.

43. Зубчанинов, В. Г. Механика процессов пластических сред / В. Г. Зубчанинов. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 352 с. — ISBN 978-5-9221-1235-2.

44. Зубчанинов, В. Г. Механика сплошных деформируемых сред / В. Г. Зубчанинов. — Тверь : ЧуДо, 2000. — 703 с. — ISBN 5-7995-0148-9.

45. Зубчанинов, В. Г. Моделирование процессов упругопластического деформирования материалов по многозвенным кусочно-ломаным прямолинейным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев,

В. И. Гультяев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2017. — № 3. — С. 203–215.

46. Зубчанинов, В. Г. Модифицированная теория течения / В. Г. Зубчанинов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2009. — № 1 (6). — С. 81–97.

47. Зубчанинов, В. Г. О проверке постулата изотропии в теории процессов сложного пластического деформирования / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультяев // Проблемы прочности и пластичности. — 2008. — № 70. — С. 18–23.

48. Зубчанинов, В. Г. Определяющие соотношения общей теории пластичности / В. Г. Зубчанинов // Устойчивость и пластичность при сложном нагружении. — Тверь : ТГТУ, 1994. — С. 14–37.

49. Зубчанинов, В. Г. Основы теории упругости и пластичности / В. Г. Зубчанинов. — Москва : Высшая школа, 1990. — 368 с.

50. Зубчанинов, В. Г. Процессы сложного нагружения конструкционной стали по пятизвенной кусочно-ломаной траектории деформирования / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гультяев, Е. Г. Алексеева // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2019. — № 61. — С. 32–44.

51. Зубчанинов, В. Г. Свойство запаздывания векторных свойств материалов для гладких траекторий при сложном нагружении / В. Г. Зубчанинов, Е. Г. Алексеева // Вестник Чувашского государственного

педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2014. — № 2 (20). — С. 21–28.

52. Зубчанинов, В. Г. Упругопластическое деформирование стали при сложном нагружении по траектории типа спираль Архимеда / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела : межвузовский сборник научных трудов. — Вып. 1. — Тверь : ТвГТУ, 2017. — С. 82–86.

53. Зубчанинов, В. Г. Численное моделирование процессов пластического деформирования стали по многозвенным кусочно-ломаным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Материалы докладов 51-й Международной. научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. — Тверь, 2018. — С. 291–293.

54. Зубчанинов, В. Г. Численное моделирование процессов сложного упругопластического деформирования стали по двузвенным ломаным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Проблемы прочности и пластичности. — 2014. — Т. 76, № 1. — С. 18–25.

55. Зубчанинов, В. Г. Экспериментальная пластичность : монография. Кн. 1. Процессы сложного деформирования / В. Г. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков, В. В. Гараников. — Тверь : ТГТУ, 2003. — 172 с.

56. Зубчанинов, В. Г. Экспериментальная пластичность : монография. Кн. 2. Процессы сложного деформирования / В. Г. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков, В. В. Гараников. — Тверь : ТГТУ, 2004. — 184 с.

57. Зубчанинов, В. Г. Экспериментальное исследование латуни Л63 при сложном нагружении по двузвенным ломаным / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев, А. С. Двужилов // Авиационные двигатели. — 2023. — № 1 (18). — С. 99–103.

58. Зубчанинов, В. Г. Экспериментальные исследования процессов сложного пластического деформирования материалов по траекториям типа веера / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев, Д. В. Зубчанинов // Проблемы прочности и пластичности. — 2005. — № 67. — С. 14–19.

59. Зубчанинов, В. Г. Экспериментальные исследования сложного нагружения латуни Л63 на двузвенных ломаных траекториях типа «смещенный веер» / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев, А. С. Двужилков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2023. — № 1 (55). — С. 18–25.

60. Зубчанинов, В.Г. Патент на полезную модель № 13092 U1 Российская Федерация, МПК G01B 7/16. Устройство для измерения деформаций при сложном нагружении : № 99120485/20 : заявл. 27.09.1999 : опубл. 20.03.2000 / Гараников В. В., Зубчанинов В. Г., Охлопков Н. Л. ; заявитель Тверской государственный технический университет.

61. Зубчанинов, Д. В. Экспериментальные исследования предельной поверхности материала / Д. В. Зубчанинов, В. И. Гулятьев // Проблемы прочности и пластичности. — 2007. — № 69. — С. 90–94.

62. Ивлев, Д. Д. Идеи и результаты А. Ю. Ишлинского в теории пластичности / Д. Д. Ивлев // Известия Академии наук. Механика твердого тела. — 2003. — № 4. — С. 167–176.

63. Ивлев, Д. Д. Механика пластических сред. В 2 т. Т. 1. Теория идеальной пластичности / Д. Д. Ивлев. — Москва : Физматлит, 2001.— 445 с.

64. Ивлев, Д. Д. Механика пластических сред. В 2 т. Т. 2. Общие вопросы. Жесткопластическое и упругопластическое состояние тел. Упрочнение. Деформационные теории. Сложные среды / Д. Д. Ивлев. — Москва : Физматлит, 2002. — 448 с.

65. Ивлев, Д. Д. О развитии идеально пластического состояния / Д. Д. Ивлев, Н. М. Матченко // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2006. — № 6. — С. 99–102.
66. Ивлев, Д. Д. Три дискуссии по механике / Д. Д. Ивлев // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. — 2007. — № 4 (54). — С. 115–123.
67. Ильюшин, А. А. Исследование определяющих соотношений и критериев разрушения на сплошных и толстостенных трубчатых цилиндрических образцах / А. А. Ильюшин, Р. А. Васин, П. А. Моссаковский // Известия РАН. Механика твердого тела. — 1994. — № 2. — С. 177–184.
68. Ильюшин, А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. — Москва : ГИТТЛ, 1948. — 378 с.
69. Ильюшин, А. А. Пластичность. Основы общей математической теории / А. А. Ильюшин. — Москва : Изд-во АН СССР, 1963. — 271 с.
70. Ильюшин, А. А. Труды (1946–1966). Т. 2. Пластичность / А. А. Ильюшин ; сост. Е. А. Ильюшина, М. Р. Короткина. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 480 с. — ISBN 5-9221-0364-4.
71. Ильюшин, А. А. Труды. Т. 1 (1935–1945) / А. А. Ильюшин ; сост. Е. А. Ильюшина, Н. Р. Короткина. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 352 с. — ISBN 5-9221-0329-6.
72. Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. — Москва : Физматлит, 2001. — 701 с.
73. Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. — Москва : Физматлит, 2003. — 704 с.
74. Кадашевич, Ю. И. О теории пластичности, не имеющей поверхности текучести / Ю. И. Кадашевич, А. Н. Михайлов // Доклады АН СССР. — 1980. — Т. 254, № 3. — С. 574–576.

75. Кадашев, Ю. И. Об учете микронапряжений в теории пластичности / Ю. И. Кадашев, В. В. Новожилов // Инженерный журнал. Механика твердого тела. — 1968. — № 3. — С. 82–91.

76. Кадашев, Ю. И. Статистическая теория пластичности, учитывающая влияние параметра Лоде / Ю. И. Кадашев, С. П. Помыткин // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1990. — № 3. — С. 91–95.

77. Кадашев, Ю. И. Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения / Ю. И. Кадашев, В. В. Новожилов // Прикладная математика и механика. — 1958. — Т. 22, № 1. — С. 78–89.

78. Кадашев, Ю. И. Эндохронная теория пластичности: общие положения, перспективы развития / Ю. И. Кадашев, А. Б. Мосолов // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1989. — № 1. — С. 161–168.

79. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. — Москва : Наука, 1969. — 420 с.

80. Ключников, В. Д. Физико-математические основы прочности и пластичности (элементы теории определяющих соотношений) / В. Д. Ключников. — Москва : Изд-во МГУ, 1994. — 188 с.

81. Койтер, В. Т. Соотношения между напряжениями и деформациями, вариационные теоремы и теорема единственности для упругопластических материалов с сингулярной поверхностью текучести / В. Т. Койтер // Механика : период. сб. переводов иностр. статей. — 1960. — № 2. — С. 117–121.

82. Коровин, И. М. Экспериментальное определение зависимости напряжений и деформаций с одной точкой излома / И. М. Коровин // Инженерный журнал. Механика твердого тела. — 1964. — Т. 4, № 3. — С. 592–600.

83. Ленский, В. С. Упрощенные варианты теории пластичности / В. С. Ленский // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1969. — Т. 5, вып. 3. — С. 18–22.

84. Ленский, В. С. Экспериментальная проверка законов изотропии и запаздывания при сложном нагружении / В. С. Ленский // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1958. — № 11. — С. 15–24.

85. Ленский, В. С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упругопластических деформаций / В. С. Ленский // Вопросы теории пластичности. — Москва : Изд-во АН СССР, 1961. — С. 58–82.

86. Леонов, М. Я. Плоская теория пластичности, основанная на синтезе скольжений / М. Я. Леонов, Е. Б. Нисневич, Б. А. Рычков // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1979. — № 6. — С. 43–49.

87. Линь, Т. Г. Физическая теория пластичности / Т. Г. Линь // Проблемы теории пластичности. Серия «Новое в зарубежной механике». Вып. 7. — Москва : Мир, 1976. — С. 7–68.

88. Ляв, А. Математическая теория упругости = A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity / А. Ляв ; пер. с 4-го англ. изд. Б. В. Булгакова и В. Я. Натансона. — Москва : ОНТИ НКТП СССР, 1935. — 674 с.

89. Макаров, Э. С. Вариант построения теории пластичности дилатирующей среды / Э. С. Макаров, Л. А. Толоконников // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1979. — № 1. — С. 88–93.

90. Малмейстер, А. К. Основы теории локальности деформаций / А. К. Малмейстер // Механика полимеров. — 1965. — № 4. — С. 12–27.

91. Матюнин, В. М. Преобразование кинетических диаграмм вдавливания сферического индентора в диаграммы растяжения для металлических конструкционных материалов / В. М. Матюнин, А. Ю.

Марченков, П. В. Волков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2022. — Т. 88, № 2. — С. 54–63. — DOI 10.26896/1028-6861-2022-88-2-54-63.

92. Москвитин, В. В. Пластичность при переменных нагружениях / В. В. Москвитин. — Москва : Изд-во Московского университета, 1965. — 263 с.

93. Никитин, И. С. Определяющие соотношения упруговязкопластической модели и теория скольжения / И. С. Никитин // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2007. — № 2. — С. 110–122.

94. Никитин, И. С. Упругопластическая модель и теория скольжения для трехмерного напряженного состояния / И. С. Никитин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2009. — № 3. — С. 171–182.

95. Новожилов, В. В. О физическом смысле инвариантов напряжений, используемых в теории пластичности / В. В. Новожилов // Прикладная математика и механика. — 1952. — Т. 16, вып. 5. — С. 617–619.

96. Партон, В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1985. — 504 с.

97. Поль, Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения / Б. Поль ; пер. В. М. Ентова и Р. Л. Салганика // Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения. — Москва : Мир, 1975. — С. 336–520.

98. Помыткин, С. П. Эндохронная теория ползучести для материалов, чувствительных к виду напряженного состояния / С. П. Помыткин // Упругость и неупругость : материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшина, Москва, 20–21 января 2021 года. — Москва:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Издательский Дом (типография), 2021. – С. 311–318.

99. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. — Москва : Наука, 1979. — 744 с.

100. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. — Москва : Наука, 1988. — 712 с.

101. Работнов, Ю. Н. О законе деформирования металлов при одноосном нагружении / Ю. Н. Работнов, Ю. В. Суворова // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1972. — № 4. — С. 41–54.

102. Радаев, Ю. Н. Пространственная задача математической теории пластичности / Ю. Н. Радаев. — Самара : Самарский университет, 2004. — 147 с.

103. Райс, Дж. Математические методы в механике разрушения / Дж. Райс ; пер. В. М. Ентова // Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения. — Москва : Мир, 1975. — С. 204–335.

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

105. Самуль, В. И. Основы теории упругости и пластичности : учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Самуль. — 2-е изд., перераб. — Москва : Высшая школа, 1982. — 264 с.

106. Свешникова, В. А. О пластическом деформировании упрочняющихся металлов / В. А. Свешникова // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1956. — № 1. — С. 155-161.

107. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. — Москва : Высшая школа, 1969. — 608 с.
108. Субботин, С. Л. Методика вычисления функционалов теории упругопластических процессов по результатам экспериментов для плоских траекторий деформирования / С. Л. Субботин, А. А. Алексеев, В. И. Гуляев // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. — 2025. — № 3 (65). — С. 214–230. — DOI 10.37972/chgpru.2025.65.3.012.
109. Темис, Ю. М. Модель неизотермического упругопластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении / Ю. М. Темис, А. Д. Худякова // Математическое моделирование и численные методы. — 2017. — Вып. 15. — С. 20–37. — DOI 10.18698/2309-3684-2017-3-2035.
110. Теория пластичности : сборник статей / пер. с англ., фр. и нем. Л. А. Телешовой и Ю. А. Цвибак ; под ред. Ю. Н. Работнова. — Москва : ГИИЛ, 1948. — 452 с.
111. Тимошенко, С. П. Инженерное образование в России / С. П. Тимошенко ; пер. с англ. В. И. Иванова-Дятлова ; под ред. Н. Н. Шапоникина ; предисл. В. Н. Лукашина. — Люберцы : ПИК ВИНТИ, 1997. — 84 с.
112. Тимошенко, С. П. История науки о сопротивлении материалов / С. П. Тимошенко. — Москва : Изд-во ГИТТЛ, 1957. — 537 с.
113. Трусов, П. В. Классические и многоуровневые конститутивные модели для описания поведения металлов и сплавов: проблемы и перспективы / П. В. Трусов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : сб. трудов . в 4 т. Т. 3,

Уфа, 19–24 августа 2019 г. — Уфа : Башкирский государственный университет, 2019. — С. 1461–1463.

114. Трусов, П. В. Многоуровневые модели в физической мезомеханике металлов и сплавов: результаты и перспективы / П. В. Трусов, А. И. Швейкин, Н. С. Кондратьев, А. Ю. Янц // Физическая мезомеханика. — 2020. — Т. 23, № 6. — С. 33–62. — DOI 10.24411/1683-805X-2020-16003.

115. Трусов, П. В. Многоуровневые модели моно и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения / П. В. Трусов, А. И. Швейкин. — Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2019. — 605 с. — ISBN 978-5-7692-1661-9. — DOI 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.

116. Трусов, П. В. Анализ поведения двухфазных сплавов: перспективы применения многоуровневых физически-ориентированных моделей (обзор) / П. В. Трусов, Е. С. Макаревич, Н. Д. Няшина, Н. В. Котельникова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2025. — № 5. — С. 111–143. — DOI 10.15593/perm.mech/2025.5.09.

117. Трусов, П. В. Теория определяющих соотношений. Ч. 2. Теория пластичности / П. В. Трусов, А. И. Швейкин. — Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2008. — 243 с.

118. Трусов, П. В. Физические теории пластичности / П. В. Трусов, П. С. Волегов, Н. С. Кондратьев. — Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2013. — 244 с. — ISBN 978-5-398-01073-2.

119. Христианович, С. А. О плоской деформации пластического материала при сложном нагружении / С. А. Христианович,

Е. И. Шемякин // Инженерный журнал. Механика твердого тела. — 1969. — № 5. — С. 138–149.

120. Хромов, А. И. Деформация и разрушение жесткопластических тел / А. И. Хромов ; РАН, Дальневост. отд-ние, Ин-т машиноведения и металлургии. — Владивосток : Дальнаука, 1996. — 180 с.

121. Черемных, С. В. Деформирование цилиндрической оболочки из стали 9Х2 при сложном нагружении / С. В. Черемных // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2024. — Т. 20, № 2. — С. 159–169. — DOI 10.22363/1815-5235-2024-20-2-159-169.

122. Черемных, С. В. Решение задачи устойчивости тонкостенных стальных цилиндрических оболочек / С. В. Черемных, С. А. Соколов // Вестник МГСУ. — 2021. — Т. 16, № 5. — С. 577–586. — DOI 10.22227/1997-0935.2021.5.577-586.

123. Черемных, С. В. Установка СН-ЭВМ для экспериментальных исследований устойчивости круговых цилиндрических оболочек при комбинированном нагружении / С. В. Черемных, П. О. Скудалов // Техника и технология транспорта. — 2019. — № S(13). — С. 45.

124. Швайко, Н. Ю. К теории пластичности, основанной на концепции скольжения / Н. Ю. Швайко // Прикладная механика. — 1976. — Т. 12, № 11. — С. 12–24.

125. Шевченко, Ю. Н. Пространственные задачи теории упругости и пластичности. В 6 т. Т. 6. Численные методы решения прикладных задач / Ю. Н. Шевченко ; АН УССР, Ин-т механики ; под общ. ред. А. Н. Гузь. — Киев : Наукова думка, 1986. — 270 с.

126. Юдин, Ю. В. Организация и математическое планирование эксперимента : учебное пособие / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, Ф. В. Водолазский. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2018. — 124 с.

127. Affolter, C. Ductile Compressive Behavior of Biomedical Alloys / C. Affolter, A. Arabi-Hashemi, U. Müller [et al.] // *Metals*. — 2020. — Vol. 10, № 1. — P. 60. — DOI 10.3390/met10010060.

128. Altenbach, H. Reuss, András / H. Altenbach, O. T. Bruhns // *Encyclopedia of Continuum Mechanics* / eds. H. Altenbach, A. Öchsner. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 2020. — DOI 10.1007/978-3-662-55771-6_316.

129. Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results / M. Bornert, F. Brémand, P. Doumalin [et al.] // *Experimental Mechanics*. — 2009. — Vol. 49, № 3. — P. 353–370. — DOI 10.1007/s11340-008-9204-7.

130. Béda, G. Zum Andenken an Professor Dr. E. Reuss / G. Béda, K. Kaszap // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. — 1984. — Vol. 28, № 2–3. — P. 129–142. — URL: <https://pp.bme.hu/me/article/view/5780/4885> (дата обращения: 16.07.2024).

131. Bishop, J. F. W. A Theory of the Plastic Distortion of a Polycrystalline Aggregate under Combined Stresses / J. F. W. Bishop, R. Hill // *Philosophical Magazine*. — 1951. — Ser. 7, Vol. 42, № 327. — P. 414–427.

132. Boussinesq, J. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques / J. Boussinesq. — Paris, 1885. — URL: <https://archive.org/details/applicationdesp00bousgoog> (дата обращения: 14.01.2024).

133. Bruhns, O. T. Some Remarks on the Work “On the Theory of Plastic Deformations and the Residual Stresses Caused by Them in the Material” by H. Hencky, *ZAMM* 4 (1924), 323–334 / O. T. Bruhns.. — URL: https://www.researchgate.net/publication/341221214_Some_remarks_on_the_work_On_the_theory_of_plastic_deformations_and_the_residual_stresses_caused_by

_them_in_the_material_by_H_Hencky_ZAMM_4_1924_323-334

(дата обращения: 09.02.2024).

134. Clebsch, A. Théorie de l'élasticité des corps solides / A. Clebsch, A.-J.-C. B. de Saint-Venant. — URL: <https://archive.org/details/thoriedellas02cleb> (дата обращения: 29.08.2023).

135. Colas, D. Experimental and Computational Approach to Fatigue Behavior of Polycrystalline Tantalum / D. Colas, S. Forest, M. Mazière [et al.] // Metals. — 2021. — Vol. 11, № 3. — P. 1–31. — DOI 10.3390/met11030416.

136. Coulomb, C. A. Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de métal / C. A. Coulomb // Mémoires de l'Académie Royale des Sciences. — Paris, 1787. — P. 229–269.

137. Davis, E. A. Increase of Stress with Permanent Strain and Stress-Strain Relations in the Plastic State for Copper under Combined Stresses / E. A. Davis // Journal of Applied Mechanics. — 1943. — Vol. 10, № 4. — P. 187–196.

138. Davis, E. A. Yielding and Fracture of Medium-Carbon Steel under Combined Stress / E. A. Davis // Journal of Applied Mechanics. — 1945. — Vol. 12, № 1. — P. 13–24.

139. Drucker, D. C. Instrumentation and Fundamental Experiments in Plasticity / D. C. Drucker, F. D. Stockton // Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis. — 1953. — Vol. 10, № 2. — P. 127–142.

140. 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.

141. Hamza, B. Damage analysis of Functionally Graded Materials under strong cyclic loading / B. Hamza, M. Mokhtari, A. Slamene, R. Medjahed, H. Benzaama, H. Dadoun // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. — 2024. — Vol. 31, № 30. — P. 12788–12807. — DOI 10.1080/15376494.2024.2328758.

142. Hamza, B. Damage analysis of functionally graded materials under biaxial cyclic loads / B. Hamza, A. Slamene, M. Mokhtari, R. Medjahed, H. Benzaama, H. Dadoun // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. — 2026. — Vol. 48. — P. 27. — DOI 10.1007/s40430-025-06015-9.

143. Hill, R. The mathematical theory of plasticity / R. Hill // Математическая теория пластичности ; пер. с англ. Э. И. Григолюка. — Москва : Гостехиздат, 1956. — 407 с.

144. Hill, R. The Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals / R. Hill // *Proceedings of the Royal Society*. — 1948. — Ser. A, Vol. 193, № 1033. — P. 281–297.

145. Hooke, R. De Potentia Restitutiva, or of Spring. Explaining the Power of Springing Bodies / R. Hooke. — London, 1678. — P. 56.

146. Hu, L. W. Anisotropic Loading Functions for Combined Stresses in the Plastic Range / L. W. Hu, J. Marin // *Journal of Applied Mechanics*. — 1955. — Vol. 22, № 1.

147. Huber, M. T. Specific work of strain as a measure of material effort / M. T. Huber // *Archives of Mechanics*. — 2004. — Vol. 56. — P. 173–190. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56339451> (дата обращения: 06.02.2024).

148. Huber, M. T. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper / M. T. Huber // *Annalen der Physik*. — 1904. — Bd. 4, № 1. — S. 153–163. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56339451>

[//www.semanticscholar.org/paper/b6351b775d0cf876345abfb426987148724866bf](https://www.semanticscholar.org/paper/b6351b775d0cf876345abfb426987148724866bf) (дата обращения: 06.02.2024).

149. Joseph Valentin Boussinesq. Biography // MacTutor. — URL: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Boussinesq/> (дата обращения: 14.01.2024).

150. Kalnaus, S. Mechanical Behavior and Failure Mechanisms of Li-ion Battery Separators / S. Kalnaus, Y. Wang, J. A. Turner // Journal of Power Sources. — 2017. — Vol. 348. — P. 255–263. — DOI 10.1016/j.jpowsour.2017.03.003.

151. Kondratev, N. Subgrain Coalescence Simulation by Means of an Advanced Statistical Model of Inelastic Deformation / N. Kondratev, P. Trusov, A. Podsedertsev, M. Baldin // Materials. — 2022. — Vol. 15, № 15. — P. 5406. — DOI 10.3390/ma15155406.

152. Korneva, A. Microstructure Evolution and Some Properties of Hard Magnetic FeCr₃₀Co₈ Alloy Subjected to Torsion Combined with Tension / A. Korneva, G. Korznikova, R. Kashaev, B. Straumal // Materials. — 2019. — Vol. 12, № 18. — P. 3019. — DOI 10.3390/ma12183019.

153. Lamé, G. Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides / G. Lamé. — Paris, 1852. — URL: <https://archive.org/details/leonssurlathori02lamgoog> (дата обращения: 28.08.2023).

154. Lebyodkin, M. A. Trends in Plasticity of Metals and Alloys / M. A. Lebyodkin, V. Taupin // Metals. — 2021. — Vol. 11, № 4. — DOI 10.3390/met11040615.

155. Lévy, M. La statique graphique et ses applications aux constructions : en 4 vol. / M. Lévy. — 3e éd. — Paris : Gauthier-Villars, 1907–1926. — URL: <https://archive.org/details/lastatiquegraph04lvgoog> (дата обращения: 10.10.2023).

156. Lode, W. Versuche über den Einfluß der mittleren Hauptspannung auf das Fließen der Metalle Eisen, Kupfer und Nickel / W. Lode // Zeitschrift für Physik. — 1926. — Bd. 36, № 11. — S. 913–939.

157. Marin, J. Plastic Stress-Strain Relations for Aluminum Alloy 14S-T6 Subjected to Combined Tension and Torsion / J. Marin, H. Wiserman // Journal of Metals. — 1953. — Vol. 5, № 9, Sec. 2. — P. 1181–1190.

158. Marin, J. Plastic Stress-Strain Relations under Radial and Non-Radial Combined Stress Loading / J. Marin, J. A. Sauer // Journal of the Franklin Institute. — 1953. — Vol. 256, № 2. — P. 119–128.

159. Masima, M. Mechanische Eigenschaften von Messingkristallen / M. Masima, G. Sachs // Zeitschrift für Physik. — 1928. — Bd. 50. — S. 161–186.

160. Meyer, D. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure / D. Meyer. — Berlin, 1911. — Bd. 53. — URL: https://archive.org/details/bub_gb_zP1BAQAAMAAJ (дата обращения: 06.02.2024).

161. Mises, R. von. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand / R. von Mises // Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse. — 1913. — Bd. 4. — S. 582–592. — URL: https://www.neo-classical-physics.info/uploads/3/0/6/5/3065888/von_mises_-_plastic_deformation.pdf (дата обращения: 06.02.2024).

162. Mohr, O. Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik / O. Mohr. — Berlin, 1906. — S. 187. — URL: <https://archive.org/details/abhandlungenaus00mohrgoog> (дата обращения: 06.02.2024).

163. Nadai, A. Mitteilungen / A. Nadai, W. Lode // Mitt. Forschungsheft VDI. — 1938. — № 303.

164. Nadai, A. Theory of flow and fracture of solids / A. Nadai // Т. 1: Пластичность и разрушение твердый тел ; пер. с англ. ; под ред. Г.С. Шапиро — Москва : Изд-во иностранной литературы, 1954. — 648 с.

165. Nadai, A. Theory of flow and fracture of solids. Перевод с англ. под ред. Г.С. Шапиро / A. Nadai // Т.2: Пластичность и разрушение твердый тел — Москва : Изд-во иностранной литературы, 1969. — 864 с.

166. Naghdi, P. M. An Experimental Study of Biaxial Stress-Strain Relations in Plasticity / P. M. Naghdi, J. C. Rowley // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 1954. — Vol. 3. — P. 63–80.

167. Nam, H. J. Is the Construct Stability of the Acetabular Cup Affected by the Acetabular Screw Configuration in Bone Defect Models? / H. J. Nam, Y. W. Lim, W. L. Jo [et al.] // Journal of Orthopaedic Surgery and Research. — 2023. — Vol. 18, № 1. — P. 354. — DOI 10.1186/s13018-023-03845-y.

168. Navier, C.-L.-M.-H. Mémoire sur les lois de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques (доклад представлен в Академию наук 14 мая 1821 г.) / C.-L.-M.-H. Navier // Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France.. — 1827. — Vol. 7. — P. 375–393.

169. Navier, C.-L.-M.-H. Résumé des leçons d'analyse données à l'École polytechnique / C.-L.-M.-H. Navier. — URL: https://archive.org/details/bub_gb_9G84AAAAMAAJ (дата обращения: 29.08.2023).

170. Neumann, F. E. Vorlesungen über die Theorie der Elasticität der festen Körper und des Lichtäthers, gehalten an der Universität Königsberg / F. E. Neumann ; hrsg. von O. E. Meyer. — URL: <https://archive.org/details/vorlesungenberd01neumgoog> (дата обращения: 29.08.2023).

171. Ohashi, Y. Effect of Third Invariant of Stress Deviator on Plastic Deformation of Mild Steel / Y. Ohashi, M. Tokuda, H. Yamashita // Journal of the

Mechanics and Physics of Solids. — 1975. — Vol. 23, № 4–5. — P. 295–323.

172. Peters, R. W. Preliminary Experiments for Testing Basic Assumptions of Plasticity Theories / R. W. Peters, N. F. Dow, S. B. Batdorf // Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis. — 1950. — Vol. 7. — P. 127–140.

173. Prager, W. Recent Development in the Mathematical Theory of Plasticity / W. Prager // Journal of Applied Physics. — 1949. — Vol. 20, Is. 3. — P. 235–241.

174. Rosh, M. Proceedings of the II International Congress of Applied Mechanics / M. Rosh, A. Eichinger. — Zürich, 1926.

175. Rosh, M. Proceedings of the International Congress of Applied Mechanics / M. Rosh, A. Eichinger. — Zürich, 1926.

176. Saint-Venant, A.-J.-C. B. de. Mémoire sur la torsion des prismes : avec des considérations sur leur flexion ainsi que sur l'équilibre intérieur des solides élastiques en général / A.-J.-C. B. de Saint-Venant. — URL: <https://searchworks.stanford.edu/view/1275955> (дата обращения: 29.08.2023).

177. Saint-Venant, A.-J.-C. B. de. Résumé des leçons données à l'École des ponts et chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines / A.-J.-C. B. de Saint-Venant, C.-L.-M.-H. Navier. — URL: <https://searchworks.stanford.edu/view/1214184> (дата обращения: 29.08.2023).

178. Salençon, J. About Tresca's Memoirs on the Fluidity of Solids (1864–1870) / J. Salençon // Comptes Rendus. Mécanique. — 2021. — Vol. 349, No. 1. — P. 1–7. — DOI 10.5802/crmeca.69.

179. Siegmund-Schultze, R. Richard von Mises' Work for ZAMM until His Emigration in 1933 and Glimpses of the Later History of ZAMM / R. Siegmund-Schultze // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and

Mechanics. — 2020. — DOI 10.1002/zamm.202002029. — URL: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/bitstream/handle/11250/2711495/Siegmund-Schultze.pdf?sequence=4> (дата обращения: 09.02.2024).

180. Surmiri, A. Application of anisotropic continuum damage mechanics in ratcheting characterization / A. Surmiri, A. Nayebi, H. Rokhgireh // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. — 2022. — Vol. 29, № 1. — P. 70–77. — DOI 10.1080/15376494.2020.1751353.

181. Taylor, G. I. Plastic Strain in Metals / G. I. Taylor // *Journal of the Institute of Metals*. — 1938. — Vol. 62. — P. 307–324.

182. Taylor, G. I. The Distortion of an Aluminium Crystal during a Tensile Test / G. I. Taylor, C. F. Elam // *Proceedings of the Royal Society of London*. — 1923. — Ser. A, Vol. 102. — P. 643–647.

183. Taylor, G. I. The Plastic Distortion of Metals / G. I. Taylor, H. Quinney // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. — 1931. — Vol. 230, № 681–693. — P. 323–362.

184. Taylor, G. I. The Plastic Extension and Fracture of Aluminium Crystals / G. I. Taylor, C. F. Elam // *Proceedings of the Royal Society of London*. — 1925. — Ser. A, Vol. 108. — P. 28–51.

185. Todhunter, I. A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials: from Galilei to the Present Time. Vol. 1. Galilei to Saint-Venant, 1639–1850 / I. Todhunter. — URL: <https://books.google.ru/books?id=VtXVAAAAMAAJ> (дата обращения: 10.09.2022).

186. Todhunter, I. The Elastical Researches of Barré de Saint-Venant / I. Todhunter, A.-J.-C. B. de Saint-Venant. — 1889. — P. 166. — URL: <https://archive.org/details/elasticalresear00saingoo> (дата обращения: 20.01.2024).

187. Trank A. Mc Clintock and Ali S. Argon. Mechanical behavior of materials / Ф. Э. Макклиток, Деформация и разрушение материалов ; пер. с англ. — Москва : Мир, 1970. — 443 с.

188. Tresca, H. Complément au Mémoire sur l'écoulement des corps solides / H. Tresca. — 1869. — Internet Archive. — URL: <https://archive.org> (дата обращения: 29.12.2023).

189. Valanis, K. C. A Theory of Viscoplasticity without a Yield Surface / K. C. Valanis // *Archiwum Mechaniki Stosowanej*. — 1971. — Vol. 23, № 4. — P. 517–551.

190. Van Horn, K. R. Residual Stresses Introduced during Metal Fabrication / K. R. Van Horn // *Journal of Metals*. — 1953. — Vol. 5, № 3. — P. 405–422.

191. Warrington, D. Taking the Last Voyage with Newton and Pascal: The Life of Saint-Venant / D. Warrington. — 2016. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/320211461> (дата обращения: 02.09.2023).

192. Zhu, Y. Thermo-mechanically coupled cyclic elasto-viscoplastic constitutive model of metals: Theory and application / Y. Zhu, G. Kang, Q. Kan, O. T. Bruhns, Y. Liu // *International Journal of Plasticity*. — 2016. — Vol. 79. — P. 111–152. — DOI 10.1016/j.ijplas.2015.12.005.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)


 Общество с ограниченной ответственностью
«Тверьавтодорпроект»
 ООО «Тверьавтодорпроект»
 170100, г. Тверь, ул. Московская, д. 26, оф. 7
 тел./факс (4822) 50-73-10; 50-73-11
 mail@tadp.ru; tadp-2012@yandex.ru
 www.dorintver.ru; www.tadp.ru

УТВЕРЖДАЮ



Директор

ООО «Тверьавтодорпроект»

Е.Ф. Громов
Июня 2026 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы
Булгакова Александра Николаевича

Мы нижеподписавшиеся представители ООО «Тверьавтодорпроект» в лице директора Громова Евгения Федоровича, главного инженера Сосулина Станислава Владимировича, главного инженера проекта Горюнова Сергея Олеговича составили настоящий акт о том, что разработанные в диссертационной работе Булгакова Александра Николаевича «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПО ТРАЕКТОРИЯМ «СМЕЩЁННОГО ВЕЕРА» методика проведения экспериментальных исследований по сложному пластическому деформированию конструкционных изотропных материалов и расчетный модуль для обработки массива экспериментальных данных, определения параметров аппроксимации, выполнения расчетов и графического отображения результатов внедрены в производственную практику организации и позволяют совершенствовать процесс проектирования элементов мостовых конструкций.

Использование результатов данной диссертационной работы позволило повысить достоверность оценки несущей способности и устойчивости стальных элементов конструкций за счет учета реального поведения материала при сложном нагружении.

Директор ООО «Тверьавтодорпроект»

Е.Ф. Громов

Главный инженер ООО «Тверьавтодорпроект»

С.В. Сосулин

Главный инженер проекта ООО «Тверьавтодорпроект»

С.О. Горюнов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования
**«Тверской государственный технический
университет» (ТвГТУ)**
Наб. А.Никитина, д.22, г.Тверь, 170026
Тел. (4822) 52-63-35, факс (4822) 52-62-92
E-mail: common@tstu.tver.ru
<http://www.tstu.tver.ru>

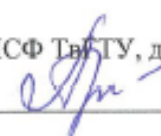
УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ТвГТУ к.т.н., доцент

М.А. Смирнов
«17» 07 2026 г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ результатов кандидатской диссертации в учебный процесс

Мы нижеподписавшиеся представители Тверского государственного технического университета, составили настоящий акт о том, что разработанные в диссертационной работе Булгакова Александра Николаевича «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПО ТРАЕКТОРИЯМ «СМЕЩЕННОГО ВЕЕРА» методика выполнения экспериментальных исследований по сложному упругопластическому деформированию конструкционных изотропных материалов и расчетный модуль для статистической обработки массива экспериментальных данных, определения параметров аппроксимации, выполнения расчетов внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению подготовки 08.04.01 Строительство профиль подготовки «Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог», а также подготовки аспирантов по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела».

Декан ИСФ ТвГТУ, д.э.н., профессор

А.А. Артемьев

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица В.1 – Экспериментальные данные (образец 1)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	1	334	0,040	-0,004	0,000	95,830	0,000	-19,065
17	1	402	0,080	-0,020	0,000	173,615	0,000	-31,106
30	1	506	0,124	-0,024	0,000	265,089	0,470	-37,795
41	1	594	0,160	-0,100	0,000	313,004	0,000	-21,741
54	1	698	0,204	-0,136	0,000	304,292	0,000	-21,072
67	1	802	0,244	-0,132	0,000	313,004	0,000	-13,713
79	1	898	0,280	-0,148	0,000	311,760	0,000	-9,031
91	1	994	0,324	-0,144	0,000	306,781	0,470	-2,007
104	1	1098	0,368	-0,148	0,000	314,249	0,000	-4,014
117	1	1202	0,412	-0,144	-0,003	317,360	0,000	-1,672
129	1	1298	0,444	-0,156	0,000	309,893	0,000	2,676
142	1	1402	0,488	-0,160	0,000	312,382	0,470	4,014
154	1	1498	0,528	-0,160	0,000	309,270	0,470	2,341
166	1	1594	0,568	-0,156	0,000	320,471	0,000	3,010
179	1	1698	0,612	-0,164	0,000	317,360	0,470	0,334
191	1	1794	0,652	-0,164	0,000	327,316	0,470	0,334
204	1	1898	0,692	-0,168	0,000	332,917	0,000	0,000
216	1	1994	0,736	-0,168	0,000	337,895	0,000	-1,003
229	1	2098	0,772	-0,160	0,000	342,873	0,470	-1,338
241	1	2194	0,816	-0,168	0,000	345,985	0,000	-1,672
254	1	2298	0,852	-0,164	-0,003	345,362	0,000	-1,003
266	1	2394	0,896	-0,172	0,000	353,452	-0,470	-1,003
278	1	2490	0,936	-0,164	0,000	359,052	0,000	-1,338
291	1	2594	0,976	-0,164	0,000	360,297	-0,470	-2,341
303	1	2690	1,016	-0,164	0,000	366,520	0,000	-0,334
314	1	2778	1,056	-0,160	0,000	372,120	0,470	-0,669
327	1	2882	1,096	-0,172	0,000	375,232	0,000	-0,669
340	1	2986	1,136	-0,172	0,000	377,721	0,000	-0,669
352	1	3082	1,176	-0,176	0,000	381,454	0,000	-1,003
364	1	3178	1,216	-0,172	-0,003	385,188	0,000	-1,338
377	1	3282	1,260	-0,172	0,000	390,166	0,000	-1,338
389	1	3378	1,296	-0,168	0,000	388,922	0,000	-1,338
402	1	3482	1,340	-0,172	0,000	396,389	0,000	-0,334
414	1	3578	1,376	-0,172	0,000	396,389	0,000	-1,672
427	1	3682	1,420	-0,164	0,000	401,989	0,000	-1,003
439	1	3778	1,456	-0,164	0,000	403,856	0,000	-0,334
451	1	3874	1,496	-0,164	0,000	403,856	0,000	-1,003
464	1	3978	1,540	-0,164	0,000	411,323	0,000	-1,003
476	1	4074	1,584	-0,160	0,000	415,057	0,000	-1,338
489	1	4178	1,624	-0,168	0,000	416,302	-0,470	-1,003
501	1	4274	1,660	-0,164	0,000	416,924	0,000	-0,334
513	1	4370	1,700	-0,160	-0,003	420,035	0,000	-0,669
526	1	4474	1,744	-0,176	0,000	425,013	0,000	-1,338

Продолжение таблицы В.1 – Экспериментальные данные (образец 1)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
538	1	4570	1,784	-0,172	0,000	429,369	0,000	-1,338
551	1	4674	1,828	-0,168	0,000	429,369	0,000	-0,334
564	1	4778	1,868	-0,172	0,000	431,858	0,000	0,000
576	1	4874	1,908	-0,176	0,000	434,348	0,000	0,000
588	1	4970	1,944	-0,172	0,000	437,459	0,000	0,000
594	1	5022	1,988	-0,172	0,000	439,326	0,000	0,000
601	1	5078	2,032	-0,168	0,003	444,304	0,000	0,000
607	1	5126	2,072	-0,168	0,000	443,682	0,000	0,000
613	1	5174	2,112	-0,168	-0,003	445,549	0,000	0,000
619	1	5222	2,148	-0,176	0,000	448,660	0,000	0,000
625	1	5270	2,192	-0,172	0,000	453,638	0,000	0,334
632	1	5326	2,232	-0,164	0,000	454,883	0,000	1,338
638	1	5374	2,272	-0,168	0,000	454,883	0,000	0,000
644	1	5422	2,316	-0,160	0,000	457,994	0,000	0,334
650	1	5470	2,352	-0,164	0,000	457,994	0,000	0,334
657	1	5526	2,400	-0,168	0,000	463,594	0,000	0,669
663	1	5574	2,436	-0,164	0,000	464,217	-0,470	1,003
669	1	5622	2,476	-0,164	0,000	465,461	0,000	1,338
675	1	5670	2,516	-0,176	0,000	469,195	0,000	0,669
682	1	5726	2,560	-0,176	0,000	470,440	0,000	1,003
688	1	5774	2,604	-0,168	0,000	476,040	0,000	1,338
691	1	5802	2,640	-0,168	0,000	476,040	0,000	4,348
694	1	5826	2,680	-0,172	0,000	478,529	0,000	8,696
697	1	5850	2,724	-0,176	0,000	481,018	0,000	6,355
700	1	5874	2,764	-0,172	0,000	482,885	0,000	5,352
703	1	5898	2,800	-0,172	0,000	482,885	0,000	5,352
706	1	5922	2,840	-0,172	0,000	482,885	0,000	8,027
710	1	5954	2,888	-0,176	0,000	485,996	0,000	7,693
713	1	5978	2,932	-0,184	0,000	487,863	0,000	7,358
716	1	6002	2,972	-0,208	0,000	490,352	0,000	7,358
719	1	6026	3,008	-0,224	0,000	490,975	0,000	7,358
722	1	6050	3,052	-0,244	-0,003	494,708	0,000	7,693
725	1	6074	3,088	-0,268	0,000	497,820	0,000	7,024
728	1	6098	3,128	-0,288	0,000	495,953	0,000	7,024
731	1	6122	3,164	-0,304	0,000	499,064	0,000	6,689
735	1	6154	3,220	-0,336	0,000	501,553	0,000	5,352
738	1	6178	3,256	-0,352	0,000	502,175	0,000	5,352
741	1	6202	3,300	-0,368	0,000	505,287	0,000	4,683
744	1	6226	3,336	-0,396	0,000	505,287	-0,470	5,017
747	1	6250	3,372	-0,416	0,000	507,776	0,000	4,348
750	1	6274	3,416	-0,440	0,000	507,154	-0,470	3,679
753	1	6298	3,452	-0,452	0,000	509,021	0,000	3,679
756	1	6322	3,500	-0,472	0,000	511,510	0,000	3,679
760	1	6354	3,540	-0,500	0,000	513,999	0,000	4,014
763	1	6378	3,584	-0,524	0,000	512,754	0,000	2,341
766	1	6402	3,624	-0,544	0,000	513,999	0,000	2,676
769	1	6426	3,664	-0,564	0,000	515,866	0,000	2,676

Продолжение таблицы В.1 – Экспериментальные данные (образец 1)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
772	1	6450	3,700	-0,588	0,000	515,866	0,000	2,341
775	1	6474	3,740	-0,604	0,000	517,110	0,000	3,345
778	1	6498	3,780	-0,624	0,000	518,355	0,000	3,010
781	1	6522	3,816	-0,636	-0,003	520,221	0,000	3,010
785	1	6554	3,872	-0,676	0,000	522,088	0,000	2,341
788	1	6578	3,912	-0,696	0,000	523,333	0,000	2,007
791	1	6602	3,952	-0,716	0,000	525,200	0,000	2,007
794	1	6626	3,988	-0,732	0,000	525,200	0,000	1,672
797	1	6650	4,028	-0,760	0,000	526,444	0,000	1,672
800	1	6674	4,068	-0,772	0,000	528,311	0,000	2,341
803	1	6698	4,108	-0,788	-0,003	528,311	0,000	2,341
806	1	6722	4,148	-0,812	0,000	530,178	0,000	3,345
810	1	6754	4,196	-0,844	0,000	530,800	0,000	2,676
813	1	6778	4,240	-0,864	0,000	531,422	0,000	2,341
816	1	6802	4,276	-0,884	0,000	532,045	0,000	2,341
819	1	6826	4,316	-0,900	0,000	533,289	0,000	2,676
822	1	6850	4,356	-0,916	0,000	534,534	0,000	2,676
825	1	6874	4,396	-0,928	0,003	535,778	0,000	3,010
828	1	6898	4,436	-0,940	0,000	537,023	0,000	2,341
831	1	6922	4,476	-0,948	0,003	539,512	0,000	3,010
835	1	6954	4,524	-0,964	0,000	537,645	-0,470	2,341
838	1	6978	4,564	-0,984	0,000	538,267	0,000	3,345
841	1	7002	4,604	-1,000	0,000	540,134	0,000	4,014
844	1	7026	4,644	-1,016	0,000	541,379	0,000	3,679
847	1	7050	4,684	-1,020	0,000	540,757	0,470	3,345
850	1	7074	4,720	-1,036	0,000	542,001	0,000	3,010
853	1	7098	4,760	-1,052	0,000	543,868	0,000	3,010
856	1	7122	4,800	-1,068	0,000	545,112	0,000	3,010
859	1	7146	4,840	-1,068	0,000	546,979	-0,470	2,341
863	1	7178	4,892	-1,084	0,000	546,357	0,000	2,341
866	1	7202	4,928	-1,112	0,000	547,602	0,000	2,676
869	1	7226	4,968	-1,128	0,000	548,846	0,000	2,341

Таблица В.2 – Экспериментальные данные (образец 2)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	1	146	0,000	-0,012	0,035	-0,607	0,000	42,725
17	1	267	0,000	-0,012	0,069	-4,249	0,000	95,559
26	1	362	0,000	-0,004	0,104	-6,070	0,000	147,090
38	1	464	-0,004	0,000	0,135	-7,284	0,000	188,836
47	1	556	0,000	-0,016	0,177	0,000	0,000	191,445
58	1	644	0,000	-0,004	0,212	1,214	0,000	192,424
70	1	740	0,000	0,000	0,243	-0,607	0,000	192,097

Продолжение таблицы В.2– Экспериментальные данные (образец 2)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
83	1	844	0,004	0,000	0,281	-0,607	0,000	192,097
95	1	940	0,000	-0,004	0,312	-0,607	0,000	192,097
108	1	1044	0,000	0,000	0,350	1,821	0,000	193,076
120	1	1140	0,000	-0,016	0,385	2,428	0,000	193,402
133	1	1244	0,000	-0,016	0,423	0,607	0,000	193,728
147	1	1356	0,000	-0,012	0,455	0,000	0,000	191,771
158	1	1444	0,000	-0,016	0,489	-0,607	0,000	196,337
170	1	1540	0,000	-0,016	0,524	-1,214	0,000	196,011
183	1	1644	0,004	-0,012	0,562	-6,677	0,000	197,316
195	1	1740	0,000	-0,016	0,593	-9,712	0,000	197,968
208	1	1844	0,000	-0,016	0,632	-7,891	0,000	201,882
220	1	1940	0,000	-0,016	0,670	-6,677	0,000	205,143
233	1	2044	0,000	-0,012	0,704	-4,856	0,000	207,100
245	1	2140	0,000	-0,004	0,739	-4,856	0,000	209,709
257	1	2236	0,000	-0,016	0,774	-3,035	0,000	212,971
271	1	2348	0,000	-0,008	0,812	-1,214	0,000	213,949
283	1	2444	0,000	-0,008	0,847	-0,607	0,000	216,232
295	1	2540	0,000	-0,012	0,881	-1,214	0,000	219,493
308	1	2644	0,000	-0,012	0,920	-1,214	0,000	222,429
320	1	2740	0,000	-0,016	0,951	-4,249	0,000	223,407
332	1	2836	0,000	-0,012	0,985	-9,105	0,000	226,016
345	1	2940	0,000	-0,012	1,020	-12,140	0,000	228,625
358	1	3044	0,000	-0,024	1,058	-13,354	0,000	229,930
369	1	3132	0,000	-0,028	1,090	-12,140	0,000	230,582
383	1	3244	0,000	-0,020	1,128	-9,105	0,000	232,213
395	1	3340	0,000	-0,024	1,162	-7,891	0,000	235,148
408	1	3444	0,000	-0,024	1,201	-4,249	0,000	236,453
420	1	3540	0,000	-0,028	1,235	-0,607	0,000	239,062
433	1	3644	0,000	-0,032	1,270	0,607	0,000	240,040
445	1	3740	0,000	-0,024	1,305	3,642	0,000	241,997
457	1	3836	0,000	-0,028	1,339	5,463	0,000	243,954
469	1	3932	-0,004	-0,036	1,374	5,463	0,000	246,563
482	1	4037	0,000	-0,028	1,409	7,891	0,000	248,194
495	1	4141	0,000	-0,040	1,444	7,284	0,000	249,172
507	1	4237	0,000	-0,032	1,482	7,284	0,000	251,455
519	1	4333	0,000	-0,028	1,516	4,856	0,000	253,086
532	1	4437	0,000	-0,036	1,551	1,214	0,000	253,738
544	1	4533	0,000	-0,036	1,586	-0,607	0,000	255,695
556	1	4632	0,000	-0,032	1,627	-0,607	0,000	258,630
559	1	4656	0,000	-0,044	1,641	-0,607	0,000	259,935
562	1	4702	0,000	-0,044	1,700	1,821	0,000	262,218
564	1	4722	0,000	-0,052	1,732	0,000	0,000	263,522
567	1	4746	0,000	-0,052	1,763	-2,428	0,000	264,501
570	1	4770	0,000	-0,044	1,797	-7,284	0,000	266,458
573	1	4794	0,000	-0,064	1,832	-10,319	0,000	267,110
575	1	4813	0,000	-0,052	1,856	-10,926	0,000	268,088
577	1	4855	0,000	-0,056	1,912	-11,533	0,000	269,719

Продолжение таблицы В.2– Экспериментальные данные (образец 2)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
578	1	4867	0,000	-0,052	1,929	-10,926	0,000	270,698
579	1	4887	0,000	-0,068	1,961	-8,498	0,000	272,002
580	1	4913	0,000	-0,072	1,992	-5,463	0,000	274,285
581	1	4927	0,000	-0,080	2,013	-6,677	0,000	274,937
582	1	4985	0,004	-0,088	2,092	-15,782	0,000	279,177
583	1	5004	0,000	-0,084	2,117	-16,996	0,000	280,482
585	1	5034	0,000	-0,096	2,158	-15,782	0,000	282,113
587	1	5052	-0,004	-0,100	2,190	-13,354	0,000	283,417
591	1	5087	-0,004	-0,128	2,235	-7,891	0,000	284,722
592	1	5095	0,000	-0,128	2,249	-7,284	0,000	285,374
593	1	5109	0,000	-0,136	2,259	-4,856	0,000	284,069
594	1	5117	0,000	-0,132	2,259	-5,463	0,000	281,786
595	1	5128	0,000	-0,132	2,259	-5,463	0,000	280,482
596	1	5137	0,000	-0,136	2,259	-4,856	0,000	279,830
597	1	5141	0,000	-0,128	2,259	-5,463	0,000	279,503

Таблица В.3 – Экспериментальные данные (образец 3)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	1	104	-0,040	0,028	0,000	-73,644	0,000	-1,650
24	1	208	-0,080	0,048	0,000	-147,901	0,000	-7,920
36	1	304	-0,120	0,072	0,000	-211,112	0,000	-10,560
49	1	408	-0,164	0,100	0,000	-274,937	0,000	-11,550
60	1	496	-0,204	0,096	-0,003	-309,918	0,000	-1,320
70	1	583	-0,240	0,124	0,003	-309,304	0,000	0,000
74	1	618	-0,288	0,140	0,003	-309,918	0,000	-0,330
77	1	642	-0,320	0,148	0,000	-304,394	0,000	0,330
81	1	677	-0,364	0,152	0,003	-308,690	0,000	-0,660
87	1	725	-0,404	0,152	0,000	-302,553	0,000	0,000
93	1	773	-0,448	0,160	-0,003	-311,759	0,000	0,000
99	1	821	-0,484	0,172	0,000	-312,986	-0,463	2,970
106	1	877	-0,528	0,176	0,000	-311,145	0,000	9,570
112	1	925	-0,564	0,188	0,000	-309,918	0,000	18,151
118	1	973	-0,608	0,212	0,000	-312,372	0,000	12,540
124	1	1021	-0,652	0,220	0,000	-316,668	-0,463	0,990
131	1	1077	-0,692	0,248	0,000	-318,509	-0,463	-11,220
137	1	1125	-0,732	0,268	0,000	-321,578	0,000	-16,170
143	1	1173	-0,772	0,304	0,000	-324,033	0,000	-17,820
149	1	1221	-0,812	0,340	0,000	-328,942	0,000	-16,500
155	1	1269	-0,852	0,356	0,000	-334,465	0,000	-12,210
162	1	1325	-0,896	0,380	0,000	-338,761	0,000	-9,240
168	1	1373	-0,932	0,400	0,000	-343,057	0,000	-7,590
174	1	1421	-0,972	0,416	0,000	-346,126	0,000	-5,610

Продолжение таблицы В.3– Экспериментальные данные (образец 3)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
181	1	1477	-1,020	0,432	-0,003	-349,194	0,000	-5,280
187	1	1525	-1,060	0,448	0,000	-354,104	-0,463	-3,960
193	1	1573	-1,100	0,464	0,000	-357,786	-0,463	-3,300
199	1	1621	-1,136	0,484	0,000	-361,468	-0,463	-2,970
205	1	1669	-1,176	0,504	0,000	-364,537	0,000	-1,980
212	1	1725	-1,224	0,520	0,000	-369,446	-0,463	-1,650
218	1	1773	-1,264	0,540	0,000	-371,901	-0,463	-1,650
224	1	1821	-1,300	0,552	0,000	-374,970	-0,463	-1,650
231	1	1877	-1,348	0,572	0,000	-378,038	-0,463	-0,990
237	1	1925	-1,384	0,588	0,003	-381,106	-0,463	-0,660
243	1	1973	-1,424	0,604	0,000	-385,402	-0,463	0,000
249	1	2021	-1,468	0,628	0,000	-388,471	-0,463	2,640
252	1	2053	-1,508	0,652	0,000	-393,380	0,000	5,280
255	1	2077	-1,544	0,664	0,000	-393,994	0,000	7,260
258	1	2101	-1,588	0,680	0,000	-400,131	0,000	8,250
261	1	2125	-1,624	0,700	-0,003	-401,972	-0,463	10,890
264	1	2149	-1,664	0,712	0,000	-406,268	-0,463	11,550
267	1	2173	-1,704	0,740	0,000	-406,268	-0,463	13,530
271	1	2205	-1,752	0,764	0,000	-413,019	0,000	12,870
274	1	2229	-1,792	0,784	0,000	-414,860	-0,463	12,870
277	1	2253	-1,836	0,800	0,000	-419,156	0,000	11,880
280	1	2277	-1,876	0,812	0,000	-422,838	-0,463	11,220
283	1	2301	-1,912	0,828	0,000	-424,679	0,000	10,560
286	1	2325	-1,952	0,844	0,000	-428,361	0,000	10,230
289	1	2349	-1,996	0,864	-0,003	-431,430	0,000	10,560
292	1	2373	-2,032	0,880	0,000	-433,885	-0,463	9,900
295	1	2397	-2,072	0,896	0,003	-437,567	-0,463	9,900
299	1	2429	-2,124	0,912	0,000	-440,022	-0,463	9,240
302	1	2453	-2,160	0,924	0,000	-440,022	0,000	9,570
305	1	2477	-2,200	0,936	0,000	-443,090	0,000	9,570
308	1	2501	-2,240	0,960	0,000	-448,000	-0,463	9,900
311	1	2525	-2,276	0,972	0,000	-449,841	0,000	11,220
314	1	2549	-2,312	0,980	-0,003	-452,295	-0,463	14,190
319	1	2601	-2,344	0,996	-0,003	-419,769	-0,463	30,031
320	1	2609	-2,336	0,992	-0,003	-404,427	0,000	28,381

Таблица В.4 – Экспериментальные данные (образец 4)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	1	211	0,012	-0,004	0,021	15,386	0,000	28,457
24	1	401	0,056	-0,004	0,045	113,859	0,000	59,891
36	1	497	0,084	-0,008	0,073	173,559	0,000	82,061
48	1	593	0,112	-0,004	0,097	227,103	0,000	105,223

Продолжение таблицы В.4 – Экспериментальные данные (образец 4)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
63	1	713	0,148	-0,072	0,128	236,335	0,000	127,393
73	1	793	0,172	-0,108	0,146	241,874	0,000	122,760
88	1	913	0,208	-0,152	0,177	241,874	-0,465	123,422
100	1	1009	0,236	-0,164	0,201	230,180	0,000	131,033
111	1	1097	0,260	-0,172	0,222	221,564	0,000	138,974
121	1	1177	0,284	-0,184	0,243	214,794	0,000	140,628
134	1	1281	0,316	-0,200	0,271	218,487	-0,465	140,297
150	1	1409	0,352	-0,204	0,295	230,180	0,000	134,341
163	1	1513	0,380	-0,208	0,323	231,411	0,000	134,341
172	1	1585	0,400	-0,208	0,344	225,872	0,000	136,989
182	1	1670	0,428	-0,208	0,368	228,950	0,000	136,658
189	1	1726	0,460	-0,212	0,396	232,027	0,000	135,003
195	1	1774	0,488	-0,216	0,420	236,950	0,000	135,996
202	1	1830	0,520	-0,220	0,448	243,720	0,000	138,312
208	1	1878	0,548	-0,240	0,472	244,336	0,000	141,621
213	1	1918	0,572	-0,260	0,489	244,951	0,000	144,599
220	1	1974	0,600	-0,276	0,521	244,951	0,000	147,908
226	1	2022	0,632	-0,288	0,545	247,413	0,000	150,555
232	1	2078	0,664	-0,304	0,573	252,337	0,000	149,231
238	1	2126	0,688	-0,312	0,597	256,030	0,000	150,886
243	1	2166	0,712	-0,328	0,618	258,491	0,000	152,210
250	1	2222	0,744	-0,340	0,642	258,491	0,000	154,857
256	1	2270	0,772	-0,356	0,670	260,953	0,000	157,504
263	1	2326	0,804	-0,372	0,697	266,492	0,000	156,511
269	1	2374	0,832	-0,388	0,718	272,647	0,000	156,180
276	1	2430	0,868	-0,404	0,750	275,109	0,000	157,835
281	1	2470	0,888	-0,416	0,767	278,186	0,000	156,842
287	1	2518	0,916	-0,432	0,791	281,879	0,000	157,835
294	1	2574	0,944	-0,448	0,819	281,263	0,000	160,151
300	1	2622	0,976	-0,460	0,843	283,725	0,000	162,467
306	1	2670	1,004	-0,480	0,864	283,725	0,000	163,791
313	1	2726	1,032	-0,496	0,895	285,571	0,000	165,776
319	1	2774	1,064	-0,512	0,920	288,033	0,000	167,761
325	1	2822	1,092	-0,524	0,944	291,726	0,000	169,085
331	1	2870	1,120	-0,540	0,968	293,572	0,000	168,092
337	1	2918	1,148	-0,556	0,992	296,034	0,000	169,416
344	1	2974	1,176	-0,572	1,020	298,496	0,000	171,732
350	1	3022	1,204	-0,584	1,044	300,342	0,000	172,063
357	1	3078	1,236	-0,604	1,069	303,420	0,000	173,056
362	1	3118	1,264	-0,616	1,093	304,035	0,000	174,379
369	1	3174	1,296	-0,636	1,114	312,036	0,000	172,725
375	1	3222	1,324	-0,648	1,145	310,805	0,000	174,710
381	1	3270	1,352	-0,664	1,169	316,344	0,000	174,048
388	1	3326	1,380	-0,688	1,194	316,960	0,000	175,703
394	1	3374	1,412	-0,704	1,218	320,037	0,000	176,364
400	1	3422	1,436	-0,720	1,242	320,037	0,000	178,350
406	1	3470	1,468	-0,732	1,267	321,883	0,000	179,012

Продолжение таблицы В.4 – Экспериментальные данные (образец 4)

Точка	Участок	Время, с	ϵ_{11} , %	ϵ_{22} , %	ϵ_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
412	1	3518	1,492	-0,744	1,291	322,499	0,000	180,004
418	1	3566	1,520	-0,764	1,315	324,961	0,000	180,004
425	1	3622	1,552	-0,780	1,343	325,576	0,000	181,990
431	1	3670	1,580	-0,792	1,367	327,422	0,000	182,320
438	1	3726	1,612	-0,812	1,391	329,884	0,000	183,313
444	1	3774	1,640	-0,820	1,419	331,115	0,000	183,644
450	1	3822	1,668	-0,836	1,444	331,731	0,000	184,968
456	1	3870	1,696	-0,848	1,468	331,731	0,000	187,284
462	1	3918	1,724	-0,864	1,492	331,115	0,000	189,931
469	1	3974	1,756	-0,880	1,520	331,115	0,000	190,924
475	1	4022	1,788	-0,896	1,544	334,808	0,000	191,585
481	1	4070	1,812	-0,908	1,568	336,039	0,000	191,585
487	1	4118	1,840	-0,928	1,593	339,116	0,000	191,255
493	1	4166	1,868	-0,936	1,617	342,193	0,000	191,255
500	1	4222	1,900	-0,960	1,641	345,271	0,000	191,255
506	1	4270	1,928	-0,976	1,669	348,963	0,000	190,262
512	1	4318	1,956	-0,988	1,693	351,425	0,000	190,924
518	1	4366	1,984	-1,004	1,714	353,272	0,000	191,255
525	1	4422	2,016	-1,016	1,742	355,733	0,000	192,247
531	1	4470	2,044	-1,032	1,766	353,272	0,000	194,563
537	1	4518	2,072	-1,044	1,791	352,656	0,000	195,225
544	1	4574	2,104	-1,060	1,822	355,118	0,000	195,887
550	1	4622	2,132	-1,076	1,843	358,195	0,000	195,887
556	1	4670	2,156	-1,088	1,867	358,195	0,000	195,225
562	1	4718	2,188	-1,108	1,891	357,580	0,000	197,211
569	1	4774	2,220	-1,120	1,919	360,042	0,000	199,196
575	1	4822	2,248	-1,136	1,943	359,426	0,000	199,527
581	1	4870	2,276	-1,152	1,967	362,503	0,000	199,196
589	1	4934	2,312	-1,172	1,999	364,350	0,000	200,519

Таблица В.5 – Экспериментальные данные (образец 5)

Точка	Участок	Время, с	ϵ_{11} , %	ϵ_{22} , %	ϵ_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	1	385	-0,016	0,000	0,024	-26,754	0,000	24,943
11	1	482	-0,052	0,028	0,045	-97,502	0,000	48,607
24	1	586	-0,084	0,044	0,069	-151,009	0,000	86,660
36	1	682	-0,112	0,056	0,097	-193,220	0,000	131,110
46	1	775	-0,140	0,076	0,125	-219,973	0,000	149,337
58	1	871	-0,168	0,088	0,146	-235,431	0,000	137,505
70	1	967	-0,196	0,096	0,174	-256,239	0,000	121,836
83	1	1071	-0,228	0,096	0,198	-272,886	0,000	107,126
95	1	1167	-0,252	0,100	0,219	-276,453	0,000	100,731
108	1	1271	-0,284	0,104	0,246	-280,020	0,000	99,452

Окончание таблицы В.5 – Экспериментальные данные (образец 5)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
120	1	1367	-0,312	0,100	0,271	-277,642	0,000	93,056
133	1	1471	-0,340	0,100	0,295	-285,371	0,000	91,457
145	1	1567	-0,376	0,104	0,319	-296,667	0,000	78,026
153	1	1631	-0,396	0,108	0,344	-291,316	0,000	89,858
160	1	1687	-0,432	0,116	0,371	-290,721	0,000	93,696
166	1	1735	-0,456	0,128	0,392	-288,343	-0,448	102,330
172	1	1783	-0,488	0,140	0,416	-288,938	0,000	108,725
179	1	1839	-0,516	0,160	0,444	-274,075	0,000	125,354
184	1	1879	-0,540	0,184	0,465	-263,373	0,000	135,587
191	1	1935	-0,572	0,240	0,493	-251,483	0,000	149,337
197	1	1983	-0,600	0,268	0,517	-256,239	-0,448	147,099
203	1	2031	-0,628	0,284	0,541	-263,373	0,000	147,419
209	1	2079	-0,656	0,304	0,566	-266,941	0,000	149,337
215	1	2127	-0,684	0,320	0,593	-271,102	0,000	150,616
222	1	2183	-0,716	0,344	0,618	-276,453	0,000	150,616
228	1	2231	-0,748	0,360	0,642	-278,237	0,000	153,494
234	1	2279	-0,772	0,368	0,663	-280,020	0,000	155,733
241	1	2335	-0,804	0,384	0,694	-282,398	0,000	156,373
247	1	2383	-0,832	0,396	0,718	-284,182	0,000	157,332
253	1	2431	-0,860	0,416	0,746	-286,560	-0,448	161,169
259	1	2479	-0,884	0,432	0,767	-287,749	0,000	163,088
266	1	2535	-0,916	0,444	0,795	-294,883	0,000	162,129
272	1	2583	-0,948	0,468	0,819	-298,450	0,000	163,088
278	1	2631	-0,972	0,480	0,843	-300,234	0,000	163,088
284	1	2679	-1,000	0,496	0,868	-304,395	0,000	164,687
291	1	2735	-1,036	0,512	0,895	-304,990	0,000	165,007
297	1	2783	-1,064	0,528	0,920	-307,368	0,000	170,443
303	1	2831	-1,088	0,540	0,947	-307,368	0,000	169,803
309	1	2879	-1,116	0,556	0,968	-312,124	0,000	169,164
315	1	2927	-1,148	0,576	0,992	-315,097	0,000	170,123
322	1	2983	-1,176	0,592	1,020	-315,691	0,000	173,641
328	1	3031	-1,208	0,612	1,041	-317,475	0,000	174,920
334	1	3079	-1,236	0,624	1,065	-318,664	0,000	176,519
340	1	3127	-1,260	0,644	1,086	-319,259	0,000	178,757
346	1	3175	-1,292	0,660	1,114	-321,042	0,448	181,635
353	1	3231	-1,316	0,672	1,142	-318,664	0,000	184,513
359	1	3279	-1,348	0,696	1,166	-316,880	0,000	189,310
366	1	3335	-1,380	0,716	1,194	-321,042	0,000	190,269
372	1	3383	-1,408	0,744	1,218	-318,664	0,000	193,787
378	1	3431	-1,436	0,760	1,242	-320,448	0,000	197,304
384	1	3479	-1,464	0,768	1,267	-324,015	0,000	197,944
390	1	3527	-1,492	0,784	1,291	-327,582	0,000	196,025
396	1	3575	-1,524	0,796	1,315	-334,716	0,000	196,985
403	1	3631	-1,556	0,820	1,343	-340,067	0,000	197,944
409	1	3679	-1,580	0,836	1,367	-341,256	0,448	195,705

Окончание таблицы В.5 – Экспериментальные данные (образец 5)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
415	1	3727	-1,604	0,848	1,391	-340,661	0,000	197,944
422	1	3783	-1,636	0,864	1,419	-341,850	0,000	201,462
428	1	3831	-1,664	0,876	1,440	-343,634	0,000	201,781
434	1	3879	-1,696	0,896	1,468	-344,823	0,000	204,020
440	1	3927	-1,724	0,912	1,492	-346,607	0,000	202,101
447	1	3983	-1,756	0,920	1,520	-351,363	0,000	201,462
453	1	4031	-1,780	0,928	1,544	-355,524	0,000	201,142
459	1	4079	-1,808	0,936	1,565	-359,686	0,000	198,583
465	1	4127	-1,836	0,944	1,589	-363,253	0,000	199,223
471	1	4175	-1,868	0,944	1,614	-366,226	0,000	197,944
478	1	4231	-1,896	0,944	1,641	-369,198	0,000	199,223
484	1	4279	-1,924	0,956	1,669	-370,387	0,000	200,502
490	1	4327	-1,952	0,960	1,690	-370,387	0,000	203,060
497	1	4383	-1,984	0,964	1,718	-372,171	0,000	203,700
503	1	4431	-2,016	0,976	1,745	-373,360	0,000	205,938
509	1	4479	-2,040	0,976	1,766	-372,766	0,000	207,218
515	1	4527	-2,064	0,984	1,791	-374,549	0,000	208,177
521	1	4575	-2,096	0,992	1,811	-377,522	0,000	207,857
527	1	4623	-2,128	0,992	1,839	-379,900	0,000	209,456
534	1	4679	-2,160	1,004	1,867	-384,656	0,000	207,218
540	1	4727	-2,184	1,004	1,891	-387,629	0,000	209,136
546	1	4775	-2,216	1,008	1,915	-390,007	0,000	205,619
552	1	4823	-2,240	1,020	1,940	-392,385	0,000	206,578
559	1	4879	-2,276	1,020	1,967	-396,546	0,000	207,857
565	1	4927	-2,300	1,036	1,992	-395,952	0,000	206,578
572	1	4983	-2,328	1,032	2,020	-393,574	0,000	211,055
577	1	5023	-2,352	1,040	2,033	-392,979	0,000	212,974
584	1	5079	-2,388	1,052	2,065	-371,577	0,000	229,922
590	1	5127	-2,416	1,068	2,089	-364,442	0,448	234,399
596	1	5175	-2,440	1,076	2,113	-366,226	0,000	233,759
602	1	5223	-2,468	1,084	2,138	-369,793	0,000	233,120
609	1	5279	-2,504	1,088	2,165	-376,927	0,000	230,561
615	1	5327	-2,532	1,092	2,190	-384,062	0,000	225,765
621	1	5375	-2,560	1,100	2,217	-389,412	0,000	221,927
627	1	5431	-2,592	1,104	2,249	-401,303	0,448	214,253
628	1	5439	-2,604	1,108	2,256	-403,086	0,000	210,415

Таблица В.6 – Экспериментальные данные (образец 6)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	1	254	0,024	-0,044	0,024	38,740	0,490	37,752

Продолжение таблицы В.6 – Экспериментальные данные (образец 6)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
22	1	350	0,056	-0,112	0,049	85,873	0,000	69,616
34	1	446	0,084	-0,136	0,073	134,943	0,490	102,519
46	1	542	0,116	-0,140	0,101	175,620	0,490	133,344
58	1	638	0,140	-0,160	0,121	182,076	0,490	134,729
65	1	700	0,168	-0,180	0,142	194,344	0,490	129,880
72	1	756	0,200	-0,204	0,174	196,281	0,490	126,763
75	1	783	0,224	-0,228	0,194	196,927	0,490	129,534
78	1	807	0,252	-0,244	0,219	198,864	0,490	127,802
81	1	831	0,280	-0,284	0,243	196,281	0,490	128,495
85	1	863	0,320	-0,296	0,274	194,990	0,490	130,573
88	1	887	0,348	-0,304	0,298	198,218	0,000	130,573
91	1	911	0,372	-0,292	0,319	201,446	0,490	129,188
94	1	935	0,400	-0,312	0,347	200,801	0,490	128,495
97	1	959	0,424	-0,320	0,371	198,218	0,490	134,037
100	1	983	0,456	-0,320	0,396	194,344	0,490	136,115
103	1	1007	0,484	-0,316	0,420	196,927	0,490	135,768
107	1	1039	0,524	-0,328	0,444	197,572	0,490	138,193
109	1	1055	0,540	-0,332	0,462	191,761	0,000	143,734
112	1	1093	0,576	-0,348	0,500	178,202	0,000	159,666
115	1	1117	0,600	-0,364	0,521	184,013	0,490	159,320
118	1	1141	0,632	-0,376	0,545	184,659	0,490	162,437
121	1	1165	0,660	-0,368	0,569	189,179	0,490	163,130
124	1	1189	0,684	-0,400	0,593	193,698	0,490	163,822
127	1	1221	0,720	-0,424	0,618	179,494	0,000	171,788
130	1	1245	0,748	-0,520	0,649	189,824	0,000	172,827
133	1	1269	0,772	-0,552	0,670	195,635	0,490	171,442
137	1	1302	0,808	-0,504	0,701	200,155	0,000	169,018
150	2	1404	0,840	-0,516	0,708	215,005	0,490	158,974
158	2	1475	0,884	-0,536	0,708	237,603	0,490	142,695
164	2	1523	0,924	-0,536	0,708	254,390	0,490	126,763
170	2	1571	0,960	-0,544	0,708	264,721	0,490	115,334
176	2	1619	1,000	-0,560	0,708	273,115	0,000	105,636
183	2	1675	1,044	-0,608	0,708	282,800	0,490	96,977
189	2	1723	1,084	-0,624	0,708	290,547	0,490	88,665
195	2	1771	1,124	-0,656	0,708	296,358	0,000	83,470
201	2	1819	1,160	-0,680	0,708	301,524	0,490	78,621
207	2	1867	1,204	-0,680	0,708	306,043	0,490	72,733
214	2	1923	1,248	-0,716	0,708	313,791	0,490	67,538
220	2	1971	1,288	-0,748	0,708	313,791	0,000	64,074
226	2	2019	1,324	-0,768	0,708	312,500	0,490	71,348
232	2	2067	1,368	-0,752	0,708	320,248	0,000	64,767
238	2	2115	1,408	-0,764	0,708	323,476	0,490	62,689
245	2	2171	1,452	-0,776	0,708	327,996	0,490	57,840
251	2	2219	1,492	-0,804	0,708	331,224	0,490	55,416
257	2	2267	1,528	-0,820	0,708	333,161	0,490	53,338

Продолжение таблицы В.6 – Экспериментальные данные (образец 6)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
264	2	2323	1,576	-0,840	0,708	337,681	0,490	51,259
270	2	2371	1,616	-0,848	0,708	339,618	0,490	48,835
276	2	2419	1,656	-0,860	0,708	342,846	0,490	46,757
282	2	2467	1,692	-0,920	0,708	346,074	0,490	45,718
289	2	2523	1,740	-0,924	0,708	348,011	0,490	44,332
295	2	2571	1,776	-0,928	0,708	350,594	0,490	42,947
301	2	2619	1,816	-0,980	0,708	353,177	0,490	40,869
307	2	2667	1,856	-0,988	0,708	356,405	0,000	39,830
314	2	2723	1,900	-1,008	0,708	358,988	0,490	38,791
320	2	2771	1,944	-1,020	0,711	361,570	0,000	37,752
326	2	2819	1,984	-1,044	0,708	362,862	0,000	37,406
332	2	2867	2,020	-1,060	0,708	363,507	0,490	35,674
339	2	2923	2,068	-1,084	0,708	368,672	0,000	34,635
345	2	2971	2,104	-1,088	0,708	369,964	0,490	33,596
351	2	3019	2,148	-1,096	0,704	371,255	0,490	32,903
357	2	3067	2,180	-1,140	0,704	369,964	0,000	31,864
363	2	3115	2,220	-1,164	0,708	372,546	0,490	31,864
370	2	3171	2,264	-1,172	0,708	372,546	0,000	30,132
376	2	3219	2,308	-1,192	0,708	377,712	0,490	30,132
382	2	3267	2,348	-1,216	0,708	379,649	0,000	30,479
389	2	3323	2,392	-1,236	0,708	380,294	0,490	28,747
390	2	3331	2,400	-1,248	0,708	379,649	0,490	28,747

Таблица В.7 – Экспериментальные данные (образец 7)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	1	355	0,024	-0,012	0,028	36,453	-0,451	43,038
19	1	436	0,056	-0,028	0,049	104,579	0,000	77,405
31	1	532	0,080	-0,024	0,073	164,935	0,000	113,698
43	1	628	0,112	-0,024	0,097	204,376	0,000	139,072
56	1	732	0,140	-0,044	0,121	203,181	0,000	142,605
66	1	812	0,164	-0,044	0,146	201,388	0,000	144,211
81	1	932	0,200	-0,100	0,174	188,839	0,000	151,598
92	1	1020	0,224	-0,136	0,194	179,277	0,000	153,525
105	1	1124	0,256	-0,164	0,222	182,863	0,000	152,562
116	1	1213	0,284	-0,164	0,250	189,437	0,000	155,131
123	1	1269	0,316	-0,184	0,274	191,229	-0,451	148,065
126	1	1296	0,340	-0,192	0,295	202,584	0,000	145,817
129	1	1320	0,368	-0,208	0,319	209,157	0,000	141,320
132	1	1344	0,400	-0,200	0,347	213,938	0,000	140,357
136	1	1376	0,432	-0,212	0,375	218,718	0,000	137,787

Продолжение таблицы В.7 – Экспериментальные данные (образец 7)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
139	1	1400	0,460	-0,220	0,399	224,694	0,000	136,824
142	1	1424	0,488	-0,208	0,423	229,475	0,000	138,430
145	1	1448	0,512	-0,212	0,444	235,451	0,000	140,357
148	1	1472	0,544	-0,232	0,472	236,049	0,000	141,963
151	1	1496	0,572	-0,248	0,493	239,037	0,000	144,211
154	1	1520	0,600	-0,252	0,517	239,634	0,000	146,459
158	1	1552	0,636	-0,280	0,552	240,232	0,000	152,240
161	1	1576	0,660	-0,316	0,576	242,025	0,000	154,810
164	1	1600	0,692	-0,312	0,597	241,427	0,000	157,058
167	1	1624	0,720	-0,336	0,621	243,220	0,000	159,306
170	1	1648	0,744	-0,348	0,645	248,000	0,000	159,306
173	1	1672	0,776	-0,360	0,670	251,586	0,000	159,306
176	1	1696	0,800	-0,364	0,694	255,172	-0,451	161,876
184	2	1768	0,812	-0,364	0,725	236,646	0,000	171,832
191	2	1824	0,820	-0,372	0,763	209,157	-0,451	183,716
197	2	1872	0,820	-0,388	0,798	188,839	0,000	194,315
204	2	1928	0,816	-0,396	0,836	165,533	0,000	201,381
210	2	1976	0,816	-0,396	0,871	148,800	0,000	207,805
216	2	2024	0,816	-0,404	0,906	135,653	0,000	213,586
222	2	2072	0,816	-0,412	0,940	126,092	0,000	218,404
229	2	2128	0,820	-0,396	0,979	112,347	0,000	222,258
235	2	2176	0,820	-0,396	1,013	99,798	0,000	225,791
241	2	2224	0,820	-0,404	1,048	90,236	0,000	229,645
247	2	2272	0,816	-0,404	1,083	81,272	0,000	232,857
253	2	2320	0,816	-0,392	1,114	72,906	-0,451	234,142
260	2	2376	0,816	-0,400	1,152	62,150	0,000	239,923
266	2	2424	0,816	-0,400	1,190	56,771	0,000	240,887
272	2	2472	0,816	-0,388	1,221	53,186	0,000	242,814
278	2	2520	0,816	-0,392	1,256	50,795	0,000	245,704
284	2	2568	0,816	-0,392	1,291	48,405	0,000	248,595
290	2	2616	0,816	-0,392	1,326	46,612	0,000	248,595
297	2	2672	0,816	-0,396	1,367	46,612	0,000	252,128
303	2	2720	0,816	-0,412	1,398	45,417	0,000	252,449
309	2	2768	0,816	-0,416	1,433	41,831	0,000	255,019
316	2	2824	0,816	-0,412	1,471	38,246	0,000	255,340
322	2	2872	0,816	-0,400	1,506	34,063	0,000	256,946
328	2	2920	0,816	-0,396	1,541	31,075	0,000	259,194
334	2	2968	0,820	-0,420	1,572	27,489	0,000	260,479
340	2	3016	0,816	-0,392	1,607	23,306	0,000	261,763
347	2	3072	0,816	-0,388	1,648	18,525	0,000	264,975
353	2	3120	0,816	-0,400	1,679	17,330	0,000	265,618
359	2	3168	0,816	-0,384	1,714	17,330	0,000	267,224
366	2	3224	0,816	-0,384	1,756	17,330	0,000	268,829
372	2	3272	0,812	-0,376	1,784	16,135	-0,451	269,793
378	2	3320	0,816	-0,380	1,822	16,135	0,000	273,005

Продолжение таблицы В.7 – Экспериментальные данные (образец 7)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
384	2	3368	0,816	-0,368	1,856	17,330	0,000	274,290
391	2	3424	0,816	-0,352	1,895	17,330	0,000	276,538
397	2	3472	0,812	-0,356	1,933	17,928	0,000	278,786
403	2	3520	0,820	-0,336	1,964	15,537	0,000	279,428
409	2	3568	0,816	-0,344	1,995	11,952	-0,451	281,034
415	2	3616	0,816	-0,324	2,033	8,964	0,000	281,034
422	2	3672	0,820	-0,320	2,068	5,378	-0,451	283,604
428	2	3720	0,820	-0,304	2,106	-6,574	0,000	284,567
434	2	3768	0,816	-0,304	2,141	-14,342	0,000	284,246
439	2	3808	0,820	-0,296	2,169	-19,123	0,000	285,531

Таблица В.8 – Экспериментальные данные (образец 8)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	1	321	0,024	-0,004	0,021	41,530	0,000	24,364
28	1	417	0,052	-0,008	0,045	106,061	0,000	52,845
41	1	521	0,080	-0,008	0,073	175,064	0,000	84,758
53	1	617	0,112	-0,020	0,097	234,483	-0,483	107,406
63	1	698	0,136	-0,056	0,121	240,234	0,000	114,955
69	1	746	0,168	-0,148	0,142	242,150	0,000	113,926
75	1	794	0,200	-0,172	0,170	245,345	-0,483	113,583
82	1	850	0,228	-0,204	0,198	242,150	0,000	113,926
88	1	898	0,252	-0,224	0,219	239,595	0,000	120,446
94	1	946	0,280	-0,236	0,243	240,872	-0,966	117,701
100	1	994	0,308	-0,244	0,271	244,067	-0,483	121,818
106	1	1042	0,344	-0,260	0,291	247,901	-0,483	114,269
113	1	1098	0,372	-0,260	0,319	244,067	-0,483	121,132
119	1	1146	0,396	-0,276	0,347	245,345	0,000	123,191
125	1	1194	0,424	-0,280	0,371	247,262	0,000	124,907
131	1	1242	0,452	-0,284	0,392	242,150	0,000	125,593
138	1	1298	0,484	-0,276	0,423	240,872	0,000	130,740
144	1	1346	0,512	-0,284	0,448	244,706	0,000	129,025
150	1	1394	0,540	-0,292	0,468	244,067	-0,483	130,054
157	1	1450	0,576	-0,300	0,496	245,345	-0,483	135,545
163	1	1498	0,600	-0,312	0,517	246,623	0,000	136,574
169	1	1546	0,632	-0,324	0,545	246,623	-0,966	140,005
176	1	1602	0,656	-0,336	0,573	253,651	-0,483	138,633
182	1	1650	0,688	-0,352	0,593	259,401	-0,483	138,290
188	1	1698	0,716	-0,368	0,621	263,235	0,000	138,633
194	1	1746	0,740	-0,376	0,642	268,346	0,000	137,260
200	1	1794	0,772	-0,396	0,666	270,902	0,000	138,290
206	1	1842	0,800	-0,412	0,691	270,902	-0,483	141,378
217	2	1932	0,792	-0,416	0,704	226,177	0,000	145,153

Продолжение таблицы В.8 – Экспериментальные данные (образец 8)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
230	2	2036	0,756	-0,412	0,704	151,424	0,000	149,957
243	2	2140	0,712	-0,412	0,701	89,449	0,000	150,300
257	2	2299	0,672	-0,416	0,704	22,362	-0,483	144,810
271	2	2508	0,652	-0,404	0,704	-4,472	-0,966	144,123
276	2	2741	0,588	-0,412	0,704	-75,392	0,000	134,515
285	2	2805	0,556	-0,404	0,704	-104,783	0,000	127,995
299	2	2917	0,512	-0,396	0,708	-139,284	0,000	121,818
311	2	3013	0,468	-0,380	0,701	-166,758	0,000	111,867
323	2	3109	0,436	-0,368	0,704	-187,203	-0,483	109,122
336	2	3213	0,388	-0,352	0,704	-207,010	0,000	104,318
348	2	3309	0,348	-0,340	0,704	-222,983	0,000	98,827
360	2	3405	0,308	-0,316	0,704	-238,317	0,000	94,366
373	2	3509	0,264	-0,296	0,701	-252,373	0,000	88,190
386	2	3613	0,228	-0,276	0,708	-264,512	0,000	84,415
398	2	3709	0,188	-0,260	0,704	-274,735	0,000	76,179
410	2	3805	0,144	-0,240	0,704	-284,319	0,000	72,405
424	2	3917	0,104	-0,220	0,704	-294,542	0,000	63,826
434	2	4004	0,064	-0,196	0,704	-301,570	0,000	60,394
440	2	4052	0,024	-0,180	0,704	-311,792	0,000	58,679
453	2	4156	-0,064	-0,132	0,704	-326,488	-0,483	49,414
459	2	4204	-0,100	-0,116	0,704	-333,516	-0,483	47,012
465	2	4252	-0,140	-0,096	0,704	-337,988	-0,483	44,953
471	2	4300	-0,180	-0,076	0,704	-341,822	-0,483	45,296
478	2	4356	-0,224	-0,052	0,704	-347,572	-0,483	41,864
484	2	4404	-0,260	-0,036	0,704	-353,322	-0,966	40,492
490	2	4452	-0,304	-0,012	0,704	-357,156	-0,966	39,805
496	2	4500	-0,344	0,008	0,704	-362,906	-0,483	38,433
502	2	4548	-0,384	0,028	0,704	-366,739	0,000	37,747
508	2	4596	-0,416	0,048	0,708	-370,573	0,000	38,090
515	2	4652	-0,468	0,068	0,704	-376,962	0,000	35,688
521	2	4700	-0,508	0,092	0,701	-379,518	0,000	35,001
528	2	4756	-0,552	0,120	0,708	-382,712	-0,483	35,001
534	2	4804	-0,592	0,140	0,704	-386,546	0,000	35,001
540	2	4852	-0,628	0,160	0,704	-389,741	-0,483	33,972
546	2	4900	-0,672	0,180	0,704	-394,852	-0,483	30,884
552	2	4948	-0,712	0,200	0,704	-399,324	0,000	31,913
558	2	4996	-0,748	0,216	0,704	-401,241	-0,483	31,570
565	2	5052	-0,796	0,240	0,704	-406,991	0,000	31,227
571	2	5100	-0,828	0,264	0,704	-406,991	0,000	29,854
577	2	5148	-0,872	0,288	0,704	-412,103	-0,483	28,825
583	2	5196	-0,912	0,304	0,704	-415,936	-0,966	27,452
588	2	5242	-0,956	0,332	0,704	-421,686	0,000	27,452
591	2	5266	-0,992	0,356	0,704	-424,242	-0,483	27,452
594	2	5290	-1,032	0,376	0,704	-426,159	0,000	25,050
597	2	5314	-1,072	0,400	0,704	-429,354	-0,966	24,707

Продолжение таблицы В.8 – Экспериментальные данные (образец 8)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
601	2	5346	-1,124	0,436	0,704	-433,826	-0,483	20,932
604	2	5370	-1,164	0,464	0,704	-436,382	0,000	16,471

Таблица В.9 – Экспериментальные данные (образец 9)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	1	388	0,020	-0,028	0,035	40,073	0,466	34,129
14	1	465	0,052	-0,036	0,049	99,259	0,466	56,661
26	1	561	0,084	-0,040	0,073	157,211	0,466	85,820
39	1	665	0,112	-0,044	0,101	208,382	0,466	122,600
51	1	761	0,148	-0,108	0,121	205,916	0,466	138,174
63	1	857	0,172	-0,132	0,146	197,285	0,466	143,476
75	1	953	0,196	-0,136	0,170	192,969	0,466	143,144
86	1	1041	0,228	-0,144	0,194	206,532	0,466	136,849
98	1	1137	0,252	-0,160	0,215	219,479	0,466	130,884
110	1	1236	0,284	-0,176	0,246	229,343	0,466	127,239
116	1	1284	0,312	-0,188	0,271	234,892	0,466	123,263
122	1	1332	0,344	-0,204	0,295	238,591	0,466	123,263
128	1	1385	0,368	-0,224	0,323	208,998	0,466	137,180
134	1	1433	0,400	-0,224	0,344	218,863	0,466	137,180
140	1	1481	0,424	-0,236	0,368	220,712	0,466	136,186
147	1	1537	0,456	-0,240	0,399	223,178	0,466	134,198
153	1	1585	0,488	-0,252	0,423	229,343	0,466	132,872
159	1	1633	0,512	-0,256	0,444	236,125	0,466	128,565
165	1	1681	0,544	-0,264	0,468	245,989	0,466	130,553
171	1	1729	0,572	-0,280	0,496	247,839	0,466	132,210
178	1	1785	0,608	-0,300	0,521	245,989	0,000	139,831
184	1	1833	0,632	-0,308	0,538	235,508	0,000	147,783
190	1	1881	0,660	-0,336	0,569	231,193	0,000	155,736
196	1	1929	0,684	-0,356	0,590	225,644	0,000	163,688
202	1	1977	0,712	-0,376	0,618	234,892	0,466	162,694
208	1	2025	0,740	-0,400	0,642	240,441	0,466	160,706
215	1	2081	0,772	-0,412	0,666	249,688	0,466	158,718
221	1	2129	0,800	-0,428	0,694	255,237	0,466	158,055
229	2	2204	0,804	-0,448	0,711	204,683	0,000	168,327
244	2	2324	0,772	-0,456	0,743	151,046	0,466	185,226
257	2	2428	0,744	-0,468	0,767	98,026	0,466	193,841
269	2	2524	0,716	-0,468	0,791	57,952	0,000	196,161
283	2	2636	0,692	-0,472	0,819	24,661	0,466	200,800
288	2	2786	0,672	-0,468	0,843	1,850	0,000	199,474
293	2	2941	0,632	-0,468	0,871	-43,773	0,931	198,811

Продолжение таблицы В.9 –Экспериментальные данные (образец 9)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
304	2	3029	0,604	-0,468	0,899	-70,283	0,000	197,817
315	2	3117	0,572	-0,464	0,920	-93,710	0,000	193,510
326	2	3213	0,544	-0,456	0,944	-116,521	0,466	194,172
332	2	3261	0,516	-0,448	0,968	-133,167	0,466	192,516
338	2	3309	0,484	-0,444	0,992	-146,730	0,466	192,516
344	2	3357	0,456	-0,424	1,013	-160,910	0,466	190,528
350	2	3405	0,432	-0,420	1,041	-172,624	0,000	190,528
356	2	3453	0,400	-0,404	1,062	-181,255	0,466	190,528
363	2	3509	0,368	-0,396	1,093	-189,886	0,000	190,528
369	2	3557	0,344	-0,384	1,114	-199,134	0,931	188,208
375	2	3605	0,312	-0,372	1,145	-207,149	0,000	188,539
382	2	3661	0,280	-0,368	1,169	-213,314	0,000	188,539
386	2	3697	0,260	-0,352	1,187	-220,712	0,466	189,865
389	2	3721	0,228	-0,344	1,218	-229,343	0,466	187,877
392	2	3745	0,200	-0,336	1,239	-237,358	0,000	184,232
395	2	3769	0,172	-0,320	1,260	-240,441	0,000	186,551
399	2	3801	0,136	-0,308	1,294	-241,057	0,466	188,539
402	2	3825	0,104	-0,300	1,315	-245,373	0,466	189,202
405	2	3849	0,080	-0,284	1,343	-247,222	0,000	191,190
408	2	3873	0,052	-0,280	1,367	-246,606	0,466	193,510
411	2	3897	0,024	-0,272	1,388	-253,387	0,000	192,847
414	2	3921	-0,004	-0,264	1,416	-257,086	0,000	192,847
417	2	3945	-0,028	-0,244	1,440	-257,086	0,000	194,172
420	2	3969	-0,056	-0,248	1,461	-259,552	0,466	194,835
424	2	4001	-0,096	-0,216	1,492	-260,169	0,466	197,817
427	2	4025	-0,124	-0,208	1,516	-263,252	0,466	200,137
430	2	4049	-0,148	-0,204	1,544	-266,334	0,000	198,811
433	2	4073	-0,176	-0,196	1,568	-272,499	0,000	199,805
436	2	4097	-0,208	-0,180	1,589	-273,732	0,466	199,474
439	2	4121	-0,232	-0,168	1,614	-277,431	0,466	199,474
442	2	4145	-0,260	-0,164	1,638	-280,514	0,466	200,800
445	2	4169	-0,288	-0,148	1,662	-284,213	0,000	198,480
448	2	4193	-0,316	-0,144	1,690	-295,310	0,000	196,823
452	2	4225	-0,356	-0,124	1,718	-298,393	0,466	195,498
455	2	4249	-0,380	-0,112	1,742	-303,325	0,466	195,498
458	2	4273	-0,408	-0,100	1,766	-304,558	0,000	194,504
461	2	4297	-0,440	-0,088	1,787	-308,874	0,000	195,167
464	2	4321	-0,468	-0,084	1,815	-310,723	0,466	196,823
467	2	4345	-0,496	-0,072	1,839	-312,573	0,000	195,829
470	2	4369	-0,524	-0,064	1,863	-316,888	0,000	196,161
474	2	4401	-0,556	-0,060	1,895	-321,820	0,466	195,498
477	2	4425	-0,588	-0,056	1,919	-325,519	0,466	194,172
480	2	4449	-0,612	-0,052	1,943	-329,219	0,466	194,835
483	2	4473	-0,640	-0,048	1,964	-331,068	0,000	193,841
486	2	4497	-0,672	-0,044	1,988	-335,384	0,000	193,510

Продолжение таблицы В.9 –Экспериментальные данные (образец 9)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
489	2	4521	-0,700	-0,032	2,013	-338,466	0,466	194,172
492	2	4545	-0,724	-0,028	2,040	-341,549	0,000	194,172
495	2	4569	-0,752	-0,028	2,061	-344,015	0,466	192,184
499	2	4601	-0,788	-0,012	2,092	-347,714	0,000	194,504
502	2	4625	-0,820	-0,020	2,120	-351,413	0,466	194,504
505	2	4649	-0,840	-0,012	2,141	-351,413	0,000	194,835
508	2	4673	-0,872	-0,004	2,169	-353,879	0,000	196,492
511	2	4697	-0,900	-0,012	2,193	-356,962	0,000	196,492
514	2	4721	-0,924	0,000	2,214	-356,962	0,000	197,486
517	2	4745	-0,952	0,008	2,238	-358,811	0,000	197,817
520	2	4769	-0,980	0,012	2,262	-361,277	0,000	197,817
524	2	4801	-1,020	0,012	2,290	-368,675	0,000	195,167
527	2	4825	-1,044	0,016	2,318	-372,991	0,000	192,184
530	2	4849	-1,072	0,012	2,339	-379,156	0,000	187,545
533	2	4873	-1,100	0,016	2,367	-381,622	0,000	186,883

Таблица В.10– Экспериментальные данные (образец 10)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	1	456	0,024	0,016	0,024	43,354	0,000	27,555
18	1	582	0,056	0,000	0,049	110,523	0,000	61,343
30	1	678	0,084	0,008	0,073	168,532	0,000	92,835
42	1	774	0,112	0,004	0,097	220,435	0,000	126,951
54	1	870	0,140	-0,032	0,121	235,090	0,462	128,263
66	1	967	0,172	-0,072	0,146	233,258	0,000	134,495
72	1	1015	0,200	-0,108	0,170	228,983	0,000	137,448
78	1	1063	0,232	-0,116	0,194	211,275	0,000	146,305
85	1	1119	0,260	-0,136	0,222	183,187	0,462	160,738
91	1	1167	0,284	-0,152	0,243	194,789	0,000	157,458
97	1	1215	0,316	-0,140	0,271	207,001	0,000	153,194
103	1	1263	0,340	-0,136	0,295	213,107	0,000	151,881
110	1	1319	0,372	-0,140	0,323	221,656	0,462	149,585
116	1	1367	0,400	-0,144	0,347	233,868	0,462	140,728
122	1	1415	0,428	-0,148	0,371	247,302	0,000	136,464
129	1	1471	0,456	-0,156	0,399	251,576	0,000	136,136
134	1	1511	0,488	-0,176	0,423	256,461	0,000	139,416
141	1	1567	0,520	-0,192	0,448	257,683	0,000	141,384
147	1	1615	0,548	-0,208	0,472	258,904	0,462	146,305
153	1	1663	0,572	-0,220	0,496	258,293	0,000	149,257
160	1	1719	0,604	-0,232	0,524	261,346	0,000	149,913
166	1	1767	0,632	-0,240	0,548	265,621	0,000	152,866

Продолжение таблицы В.10 – Экспериментальные данные (образец 10)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
172	1	1815	0,660	-0,264	0,573	268,063	0,000	155,162
178	1	1863	0,688	-0,280	0,597	271,116	0,000	155,162
185	1	1919	0,724	-0,296	0,621	274,780	0,000	157,786
191	1	1967	0,748	-0,312	0,649	274,780	0,000	158,114
197	1	2015	0,776	-0,328	0,673	276,612	0,000	159,098
203	1	2063	0,804	-0,340	0,697	277,833	0,000	160,410
209	2	2108	0,816	-0,348	0,697	277,833	0,000	144,993
226	2	2244	0,816	-0,352	0,649	282,108	0,000	80,697
233	2	2304	0,816	-0,348	0,611	282,108	0,000	39,693
239	2	2352	0,812	-0,360	0,579	272,948	0,462	6,561
246	2	2408	0,816	-0,348	0,541	255,851	0,000	-29,523
253	2	2468	0,816	-0,340	0,500	239,364	0,000	-62,655
263	2	2548	0,816	-0,340	0,468	227,152	0,000	-82,337
275	2	2644	0,816	-0,332	0,437	216,160	0,000	-102,020
287	2	2740	0,816	-0,336	0,399	205,169	0,000	-118,422
299	2	2836	0,816	-0,332	0,364	199,674	0,000	-126,951
312	2	2940	0,816	-0,328	0,330	192,957	0,000	-138,104
325	2	3044	0,816	-0,324	0,291	188,072	0,000	-146,961
331	2	3098	0,820	-0,320	0,260	181,966	0,000	-153,850
338	2	3154	0,816	-0,336	0,219	172,806	0,000	-163,035
344	2	3202	0,816	-0,336	0,187	166,089	0,000	-169,596
350	2	3250	0,816	-0,336	0,153	161,815	0,000	-176,484
356	2	3298	0,820	-0,336	0,118	153,266	0,000	-184,029
362	2	3346	0,816	-0,328	0,083	142,886	0,462	-188,950
369	2	3402	0,816	-0,332	0,045	133,726	0,000	-193,870
375	2	3450	0,816	-0,328	0,010	126,399	0,000	-199,119
381	2	3498	0,816	-0,320	-0,021	120,903	0,000	-202,727
388	2	3554	0,820	-0,324	-0,062	114,797	0,000	-207,320
394	2	3602	0,812	-0,324	-0,097	109,912	0,000	-210,272
400	2	3650	0,816	-0,340	-0,128	107,470	0,000	-212,896
406	2	3698	0,816	-0,328	-0,163	105,027	0,000	-215,193
413	2	3754	0,816	-0,324	-0,205	98,310	0,000	-220,441
419	2	3802	0,816	-0,328	-0,236	94,036	0,000	-222,082
425	2	3850	0,816	-0,328	-0,274	90,983	0,000	-225,362
431	2	3898	0,816	-0,332	-0,309	89,761	0,000	-228,642
437	2	3946	0,816	-0,340	-0,340	87,930	0,000	-232,251
444	2	4002	0,816	-0,340	-0,378	83,655	0,462	-234,547
450	2	4050	0,816	-0,332	-0,413	79,992	0,000	-236,187
454	2	4087	0,816	-0,336	-0,451	78,770	0,000	-239,139
457	2	4111	0,816	-0,340	-0,486	78,770	0,000	-241,764
460	2	4135	0,820	-0,340	-0,521	77,549	0,000	-242,420
463	2	4159	0,816	-0,336	-0,552	77,549	0,000	-243,732
466	2	4183	0,816	-0,344	-0,586	77,549	0,000	-247,012
469	2	4207	0,816	-0,344	-0,621	77,549	0,000	-247,996
472	2	4231	0,816	-0,348	-0,659	76,938	0,462	-249,965

Продолжение таблицы В.10 – Экспериментальные данные (образец 10)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
476	2	4263	0,816	-0,344	-0,697	75,107	0,000	-252,589
479	2	4287	0,816	-0,348	-0,736	73,275	0,000	-254,885
482	2	4311	0,820	-0,352	-0,767	72,053	0,000	-256,197
485	2	4335	0,816	-0,348	-0,802	69,611	0,000	-257,182
488	2	4359	0,816	-0,356	-0,836	67,779	0,000	-257,510
491	2	4383	0,816	-0,352	-0,868	65,337	0,000	-257,838
494	2	4407	0,816	-0,360	-0,902	64,115	0,000	-260,790
497	2	4431	0,816	-0,364	-0,937	62,894	0,000	-262,758
501	2	4463	0,816	-0,364	-0,982	61,673	0,000	-265,382
504	2	4487	0,816	-0,364	-1,017	59,841	0,000	-266,695
507	2	4511	0,816	-0,360	-1,051	58,620	0,000	-267,679
510	2	4535	0,816	-0,368	-1,083	56,788	0,000	-268,335
513	2	4559	0,816	-0,360	-1,117	54,956	0,000	-270,631
516	2	4583	0,820	-0,364	-1,156	54,345	0,000	-272,927
519	2	4607	0,816	-0,368	-1,183	51,903	0,000	-272,599
523	2	4639	0,816	-0,368	-1,228	49,460	0,000	-274,896
526	2	4663	0,816	-0,368	-1,267	48,850	0,000	-277,192
529	2	4687	0,816	-0,372	-1,298	47,629	0,000	-277,848
532	2	4711	0,816	-0,376	-1,332	48,239	0,000	-279,816
535	2	4735	0,816	-0,376	-1,367	48,239	0,000	-279,816
538	2	4759	0,816	-0,384	-1,402	48,850	0,000	-280,472
541	2	4783	0,816	-0,376	-1,437	47,629	0,000	-283,097
544	2	4807	0,816	-0,380	-1,468	48,239	0,000	-283,753
547	2	4831	0,816	-0,392	-1,503	48,239	0,000	-285,393

Таблица В.11– Экспериментальные данные (образец 11)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	1	189	0,020	0,008	0,028	40,076	-0,474	37,996
18	1	316	0,056	-0,004	0,045	105,826	-0,474	59,853
30	1	412	0,084	-0,016	0,073	161,558	-0,474	99,530
42	1	508	0,108	-0,020	0,097	215,410	-0,474	130,801
50	1	574	0,136	-0,136	0,087	215,410	-0,474	152,658
60	1	661	0,148	-0,144	0,132	187,858	-0,474	163,418
65	1	703	0,180	-0,164	0,156	189,736	-0,474	167,453
68	1	727	0,208	-0,168	0,180	197,250	-0,474	161,064
71	1	751	0,236	-0,172	0,205	202,260	-0,474	159,719
74	1	775	0,264	-0,180	0,229	207,896	-0,474	156,693
77	1	799	0,292	-0,180	0,253	211,027	-0,474	156,693
80	1	823	0,320	-0,192	0,278	214,158	-0,474	155,348
84	1	855	0,356	-0,196	0,309	221,046	-0,474	152,658

Продолжение таблицы В.11 – Экспериментальные данные (образец 11)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
87	1	879	0,384	-0,216	0,333	229,812	-0,474	150,304
90	1	903	0,412	-0,224	0,357	239,832	0,000	148,959
93	1	927	0,440	-0,236	0,378	246,093	-0,474	146,941
96	1	951	0,468	-0,252	0,403	249,224	-0,474	150,304
99	1	975	0,496	-0,272	0,427	251,103	-0,474	153,330
102	1	999	0,520	-0,284	0,451	254,234	-0,474	156,356
105	1	1023	0,548	-0,304	0,475	256,739	-0,474	156,693
109	1	1055	0,588	-0,328	0,507	263,627	-0,474	158,038
112	1	1079	0,616	-0,348	0,531	266,132	0,000	160,728
115	1	1103	0,644	-0,352	0,555	267,384	-0,474	163,418
118	1	1127	0,672	-0,376	0,579	268,010	-0,474	167,453
121	1	1151	0,696	-0,388	0,604	268,010	0,000	168,798
124	1	1175	0,724	-0,404	0,628	271,767	-0,474	171,488
128	1	1217	0,752	-0,448	0,642	201,634	-0,474	200,405
132	1	1251	0,784	-0,456	0,677	221,672	-0,474	203,095
142	2	1329	0,816	-0,484	0,708	235,448	0,000	197,043
146	2	1366	0,836	-0,488	0,691	263,627	-0,474	177,876
153	2	1422	0,868	-0,500	0,663	306,208	-0,474	143,243
159	2	1470	0,896	-0,508	0,638	330,629	-0,474	111,971
165	2	1518	0,924	-0,520	0,614	349,415	-0,474	79,355
172	2	1574	0,952	-0,536	0,586	363,191	-0,474	46,739
178	2	1622	0,984	-0,544	0,562	370,706	-0,474	22,529
181	2	1653	1,012	-0,572	0,545	377,594	-0,474	9,079
185	2	1690	1,040	-0,588	0,514	378,846	-0,474	-9,415
191	2	1738	1,068	-0,600	0,489	381,351	-0,474	-22,193
197	2	1786	1,096	-0,612	0,465	381,977	-0,474	-34,634
203	2	1834	1,124	-0,624	0,444	383,229	-0,474	-43,040
210	2	1890	1,160	-0,632	0,413	383,856	-0,474	-54,136
216	2	1938	1,184	-0,656	0,389	381,351	-0,474	-64,560
222	2	1986	1,212	-0,672	0,368	381,351	-0,474	-71,958
228	2	2034	1,240	-0,688	0,344	381,351	-0,474	-78,010
235	2	2090	1,272	-0,704	0,316	381,351	0,000	-86,080
241	2	2138	1,300	-0,716	0,291	378,846	-0,474	-90,451
244	2	2168	1,332	-0,736	0,264	380,725	0,000	-97,513
247	2	2192	1,360	-0,752	0,239	378,846	-0,474	-103,229
250	2	2216	1,384	-0,764	0,215	378,846	-0,474	-107,264
253	2	2240	1,412	-0,780	0,191	381,351	-0,474	-109,618
256	2	2264	1,444	-0,796	0,167	382,603	-0,474	-111,635
260	2	2296	1,476	-0,812	0,139	382,603	-0,474	-116,343
263	2	2320	1,504	-0,820	0,111	383,229	-0,474	-117,688
266	2	2344	1,532	-0,836	0,087	384,482	-0,474	-121,386
269	2	2368	1,560	-0,860	0,066	385,734	0,000	-121,050
272	2	2392	1,588	-0,860	0,042	388,239	-0,474	-122,731
275	2	2416	1,616	-0,876	0,017	390,118	0,000	-124,413
278	2	2440	1,644	-0,892	-0,007	388,865	-0,474	-126,766

Продолжение таблицы В.11 – Экспериментальные данные (образец 11)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
281	2	2464	1,672	-0,908	-0,031	386,987	-0,474	-131,810
284	2	2488	1,700	-0,920	-0,059	386,360	-0,474	-135,845
287	2	2512	1,728	-0,948	-0,080	385,108	-0,474	-139,208
291	2	2544	1,764	-0,964	-0,111	387,613	-0,474	-138,199
294	2	2568	1,788	-0,976	-0,135	389,491	0,000	-140,216
297	2	2592	1,820	-0,992	-0,160	390,744	-0,474	-141,561
300	2	2616	1,848	-1,012	-0,184	391,370	0,000	-144,251
303	2	2640	1,876	-1,024	-0,212	389,491	-0,474	-149,295
306	2	2664	1,904	-1,040	-0,232	388,865	-0,474	-150,976
309	2	2688	1,932	-1,052	-0,257	388,865	-0,474	-152,658
312	2	2712	1,960	-1,068	-0,281	390,118	0,000	-154,675
316	2	2744	1,996	-1,084	-0,312	392,622	-0,474	-155,011
319	2	2768	2,024	-1,100	-0,340	390,744	-0,474	-159,046
322	2	2792	2,048	-1,112	-0,361	391,370	-0,474	-160,728
325	2	2816	2,080	-1,132	-0,385	389,491	-0,474	-162,745
328	2	2840	2,108	-1,140	-0,409	389,491	0,000	-164,763
331	2	2864	2,132	-1,160	-0,430	389,491	0,000	-164,090
334	2	2888	2,160	-1,176	-0,455	390,744	-0,474	-166,108
337	2	2912	2,188	-1,184	-0,479	392,622	-0,474	-166,108
341	2	2944	2,224	-1,200	-0,514	395,127	0,000	-167,789
344	2	2968	2,252	-1,212	-0,538	395,753	-0,474	-170,143
347	2	2992	2,280	-1,228	-0,559	398,258	-0,474	-168,461
350	2	3016	2,308	-1,236	-0,583	397,632	-0,474	-170,143
353	2	3040	2,336	-1,248	-0,611	399,510	-0,474	-169,470
356	2	3064	2,364	-1,276	-0,632	401,389	-0,474	-171,151
359	2	3088	2,392	-1,288	-0,656	398,258	-0,474	-174,514
362	2	3112	2,420	-1,296	-0,684	401,389	-0,474	-175,859
365	2	3136	2,448	-1,308	-0,704	401,389	-0,474	-175,523
369	2	3168	2,484	-1,336	-0,736	404,520	-0,474	-174,514
372	2	3192	2,512	-1,348	-0,760	408,903	-0,474	-174,850
375	2	3216	2,540	-1,364	-0,784	410,782	-0,474	-175,186

Таблица В.12– Экспериментальные данные (образец 12)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	1	135	0,024	-0,012	0,028	22,012	0,000	51,916
20	1	256	0,052	-0,020	0,049	97,219	0,462	78,860
33	1	366	0,084	-0,020	0,073	171,203	0,462	106,461
45	1	462	0,112	-0,020	0,101	229,901	0,462	126,833
58	1	566	0,140	-0,024	0,125	245,187	0,462	129,461
69	1	654	0,172	-0,032	0,146	247,021	0,462	125,518

Продолжение таблицы В.12 – Экспериментальные данные (образец 12)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
82	1	758	0,200	-0,032	0,174	245,187	0,462	125,190
90	1	825	0,228	-0,036	0,201	246,410	0,462	125,518
96	1	873	0,256	-0,032	0,222	259,250	0,462	115,661
99	1	903	0,284	-0,044	0,246	261,696	0,462	118,947
102	1	927	0,316	-0,040	0,274	261,696	0,462	118,289
105	1	951	0,336	-0,040	0,288	258,638	0,462	104,489
109	1	983	0,376	-0,040	0,323	261,696	0,462	117,304
112	1	1007	0,400	-0,040	0,344	258,638	0,462	121,904
115	1	1031	0,432	-0,044	0,375	262,918	0,462	121,247
118	1	1055	0,460	-0,040	0,399	265,976	0,462	121,247
121	1	1079	0,488	-0,048	0,423	269,033	0,462	121,247
124	1	1103	0,516	-0,048	0,444	270,867	0,462	124,533
127	1	1127	0,540	-0,048	0,472	273,924	0,462	127,161
130	1	1151	0,568	-0,048	0,493	276,982	0,462	129,133
134	1	1183	0,608	-0,052	0,524	281,873	0,462	129,790
137	1	1207	0,632	-0,048	0,548	285,542	0,462	131,761
140	1	1231	0,660	-0,052	0,573	287,987	0,462	131,104
143	1	1255	0,692	-0,056	0,597	290,433	0,462	135,047
146	1	1279	0,716	-0,056	0,621	291,045	0,462	137,347
149	1	1303	0,744	-0,056	0,645	294,102	0,462	138,662
152	1	1327	0,776	-0,060	0,666	295,936	0,462	142,276
155	1	1351	0,804	-0,060	0,691	288,599	0,462	150,491
159	1	1383	0,836	-0,060	0,725	271,479	0,462	166,591
162	1	1407	0,864	-0,064	0,746	268,421	0,462	171,191
165	1	1431	0,896	-0,060	0,774	268,421	0,462	174,148
168	1	1455	0,920	-0,064	0,795	270,867	0,462	176,777
171	1	1479	0,948	-0,068	0,819	277,593	0,462	176,120
174	1	1503	0,976	-0,068	0,843	284,319	0,462	174,477
177	1	1527	1,004	-0,064	0,871	289,822	0,462	172,177
181	1	1559	1,040	-0,068	0,899	298,993	0,924	170,534
184	1	1583	1,068	-0,072	0,926	305,108	0,462	169,548
187	1	1607	1,096	-0,064	0,947	307,553	0,462	169,877
190	1	1631	1,124	-0,068	0,972	311,833	0,462	169,877
193	1	1655	1,152	-0,076	0,996	316,114	0,462	169,220
196	1	1679	1,180	-0,080	1,020	321,617	0,462	167,905
199	1	1703	1,204	-0,080	1,044	325,897	0,462	167,905
202	1	1727	1,232	-0,084	1,069	326,508	0,462	167,248
205	1	1751	1,260	-0,076	1,093	328,342	0,462	170,534
209	1	1783	1,300	-0,080	1,124	329,565	0,462	173,820
212	1	1807	1,328	-0,084	1,149	327,119	0,462	176,120
215	1	1831	1,356	-0,088	1,173	322,839	0,924	182,363
218	1	1855	1,384	-0,084	1,194	316,725	0,462	188,606
221	1	1879	1,412	-0,084	1,218	309,999	0,462	194,849
224	1	1903	1,436	-0,092	1,246	308,165	0,462	197,149
227	1	1927	1,468	-0,092	1,267	317,336	0,924	194,192

Продолжение таблицы В.12 – Экспериментальные данные (образец 12)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
230	1	1951	1,492	-0,092	1,287	324,674	0,462	191,892
233	1	1975	1,520	-0,092	1,315	327,731	0,924	189,920
237	1	2007	1,556	-0,096	1,346	335,680	0,924	189,592
240	1	2031	1,584	-0,088	1,374	339,348	0,462	188,935
243	1	2060	1,616	-0,096	1,398	342,405	0,462	187,620
251	2	2127	1,640	-0,092	1,402	347,297	0,924	144,576
257	2	2175	1,668	-0,088	1,378	382,149	0,462	114,675
263	2	2223	1,696	-0,092	1,357	401,715	0,462	88,389
269	2	2271	1,724	-0,088	1,329	412,721	0,924	67,359
275	2	2319	1,756	-0,092	1,308	420,058	0,462	48,630
281	2	2367	1,780	-0,092	1,284	426,784	0,924	29,572
288	2	2423	1,812	-0,092	1,256	430,452	0,462	11,829
294	2	2471	1,840	-0,092	1,232	431,064	0,462	-1,314
299	2	2511	1,864	-0,100	1,215	432,287	0,462	-11,172
302	2	2543	1,896	-0,100	1,187	432,898	0,924	-28,258
305	2	2567	1,924	-0,100	1,162	426,172	0,462	-46,987
313	2	2637	1,956	-0,100	1,135	413,944	0,462	-63,745
319	2	2685	1,984	-0,100	1,110	413,332	0,462	-74,259
325	2	2738	2,016	-0,100	1,079	413,944	0,462	-84,446
328	2	2762	2,044	-0,104	1,055	414,555	0,462	-88,060
331	2	2786	2,072	-0,108	1,031	417,001	0,924	-92,660
334	2	2810	2,100	-0,108	1,010	420,058	0,462	-93,646
337	2	2834	2,128	-0,104	0,982	421,892	0,462	-94,632
340	2	2858	2,156	-0,104	0,965	424,950	0,462	-95,289
343	2	2882	2,184	-0,108	0,933	427,395	0,462	-96,932
346	2	2906	2,212	-0,108	0,913	429,230	0,462	-98,246
349	2	2930	2,240	-0,104	0,888	429,230	0,462	-101,860
353	2	2962	2,276	-0,104	0,854	429,841	0,462	-105,146
356	2	2986	2,304	-0,104	0,833	430,452	0,462	-107,446
359	2	3010	2,332	-0,112	0,809	430,452	0,462	-108,432
362	2	3034	2,360	-0,108	0,784	429,841	0,462	-112,046
365	2	3058	2,388	-0,112	0,763	425,561	0,462	-119,604
369	2	3092	2,420	-0,104	0,743	405,995	0,462	-134,061
378	2	3171	2,444	-0,108	0,711	393,766	0,462	-144,247
385	2	3227	2,476	-0,108	0,684	396,823	0,462	-146,219
391	2	3275	2,504	-0,112	0,659	398,046	0,462	-149,176
397	2	3323	2,532	-0,116	0,635	395,601	0,462	-152,791
401	2	3356	2,556	-0,112	0,611	396,212	0,462	-156,076
404	2	3380	2,588	-0,116	0,586	397,435	0,462	-157,719
407	2	3404	2,616	-0,116	0,562	397,435	0,462	-161,005
410	2	3428	2,640	-0,116	0,541	397,435	0,462	-159,691
414	2	3460	2,680	-0,116	0,507	403,549	0,462	-160,019
417	2	3484	2,704	-0,116	0,482	407,218	0,462	-159,034
420	2	3508	2,736	-0,116	0,458	410,886	0,462	-159,034
423	2	3532	2,760	-0,120	0,434	413,332	0,462	-158,705

Продолжение таблицы В.12 – Экспериментальные данные (образец 12)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
426	2	3556	2,792	-0,116	0,406	416,389	0,462	-158,705
429	2	3580	2,816	-0,120	0,378	417,612	0,462	-158,376
432	2	3604	2,844	-0,120	0,357	432,287	0,462	-147,533
435	2	3628	2,872	-0,120	0,340	438,401	0,462	-144,247
439	2	3660	2,908	-0,120	0,302	442,681	0,462	-142,605
442	2	3684	2,932	-0,116	0,281	445,738	0,462	-142,605
445	2	3708	2,964	-0,120	0,257	445,127	0,462	-144,247
448	2	3732	2,996	-0,116	0,236	443,293	0,462	-146,219
451	2	3756	3,020	-0,120	0,212	442,070	0,462	-149,176
454	2	3780	3,048	-0,124	0,187	440,847	0,462	-153,119
457	2	3804	3,076	-0,140	0,163	438,401	0,462	-156,405
460	2	3828	3,104	-0,148	0,139	434,733	0,462	-161,005
463	2	3852	3,132	-0,160	0,111	436,567	0,462	-161,991
467	2	3884	3,168	-0,176	0,083	438,401	0,462	-160,348
470	2	3908	3,196	-0,192	0,059	439,624	0,462	-159,691
473	2	3932	3,224	-0,208	0,035	440,235	0,462	-161,991
476	2	3956	3,252	-0,224	0,010	437,178	0,462	-164,291
479	2	3980	3,276	-0,232	-0,014	438,401	0,462	-165,934
482	2	4004	3,304	-0,244	-0,038	437,178	0,924	-166,920
485	2	4028	3,336	-0,260	-0,062	439,013	0,462	-167,248
488	2	4052	3,364	-0,272	-0,083	440,235	0,462	-166,262
492	2	4084	3,400	-0,288	-0,118	441,458	0,462	-167,905
495	2	4108	3,428	-0,304	-0,142	441,458	0,462	-170,863
498	2	4132	3,452	-0,324	-0,167	440,235	0,924	-170,534
501	2	4156	3,484	-0,328	-0,191	440,847	0,462	-171,848
504	2	4180	3,508	-0,344	-0,212	441,458	0,462	-171,520
507	2	4204	3,536	-0,356	-0,236	434,733	0,462	-176,777
511	2	4236	3,576	-0,376	-0,267	440,235	0,462	-175,791
514	2	4260	3,600	-0,396	-0,291	440,235	0,462	-176,120
517	2	4284	3,628	-0,404	-0,316	439,013	0,462	-178,420
520	2	4308	3,660	-0,420	-0,340	438,401	0,462	-180,720
523	2	4332	3,684	-0,440	-0,364	435,344	0,462	-184,006
526	2	4356	3,716	-0,460	-0,389	432,898	0,924	-186,634
529	2	4380	3,740	-0,468	-0,416	432,898	0,462	-187,949
532	2	4404	3,768	-0,488	-0,437	435,344	0,462	-186,963
535	2	4428	3,796	-0,504	-0,462	436,567	0,462	-187,949

Таблица В.13– Экспериментальные данные (образец 13)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	1	157	0,012	0,004	0,024	15,150	0,000	44,946
13	1	280	0,048	0,004	0,052	90,293	0,000	87,938
25	1	368	0,080	-0,008	0,073	152,710	-0,458	117,251

Продолжение таблицы В.13 – Экспериментальные данные (образец 13)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
37	1	464	0,112	-0,012	0,097	201,189	-0,458	150,472
49	1	560	0,140	-0,032	0,121	198,159	0,000	151,449
62	1	664	0,172	-0,040	0,146	197,553	0,000	149,495
72	1	750	0,200	-0,048	0,170	184,221	-0,458	157,963
75	1	776	0,224	-0,060	0,194	189,069	0,000	156,986
79	1	808	0,260	-0,072	0,226	193,917	0,000	157,312
82	1	832	0,288	-0,088	0,250	197,553	0,000	156,009
85	1	856	0,316	-0,112	0,271	202,401	0,000	154,055
88	1	880	0,344	-0,132	0,298	209,673	0,000	151,123
91	1	904	0,372	-0,148	0,323	213,309	0,000	150,798
94	1	928	0,400	-0,164	0,347	216,339	0,000	151,449
97	1	952	0,424	-0,180	0,368	219,975	0,000	150,146
100	1	976	0,456	-0,196	0,392	223,611	0,000	149,821
103	1	1000	0,480	-0,204	0,420	227,247	0,000	153,729
107	1	1032	0,520	-0,216	0,448	233,307	0,000	154,380
110	1	1056	0,544	-0,232	0,468	234,519	0,000	156,334
113	1	1080	0,576	-0,256	0,500	237,549	0,000	161,220
116	1	1104	0,600	-0,268	0,524	242,397	0,000	160,894
119	1	1128	0,632	-0,284	0,545	247,244	-0,458	159,591
122	1	1152	0,656	-0,296	0,569	249,062	0,000	163,500
125	1	1176	0,684	-0,312	0,593	253,304	0,000	164,803
129	1	1208	0,724	-0,328	0,625	258,152	0,000	162,848
132	1	1232	0,748	-0,340	0,649	261,788	0,000	163,500
135	1	1256	0,776	-0,356	0,673	265,424	0,000	163,825
138	1	1280	0,804	-0,372	0,697	269,060	0,458	164,477
141	1	1304	0,832	-0,384	0,718	271,484	0,000	166,757
144	1	1328	0,860	-0,400	0,746	272,696	0,000	168,711
147	1	1352	0,892	-0,412	0,770	274,514	0,000	170,014
150	1	1376	0,916	-0,424	0,791	275,726	0,000	170,339
153	1	1400	0,944	-0,440	0,815	279,362	0,000	170,014
157	1	1432	0,980	-0,460	0,850	282,998	0,000	172,294
160	1	1456	1,008	-0,472	0,868	286,634	0,000	172,294
163	1	1480	1,036	-0,488	0,899	284,816	0,000	176,202
166	1	1504	1,064	-0,500	0,920	282,392	0,000	178,482
169	1	1528	1,092	-0,524	0,940	283,604	0,000	182,390
172	1	1552	1,120	-0,532	0,972	287,240	0,000	180,762
175	1	1576	1,148	-0,540	0,992	292,088	0,000	180,762
179	1	1608	1,180	-0,560	1,024	296,936	0,000	181,739
182	1	1632	1,216	-0,576	1,048	302,390	0,000	180,110
185	1	1656	1,240	-0,588	1,076	304,814	0,000	181,413
188	1	1680	1,268	-0,608	1,097	309,056	0,000	178,482
191	1	1704	1,296	-0,616	1,121	312,086	0,458	180,436
194	1	1728	1,324	-0,632	1,145	315,115	0,000	178,156
197	1	1752	1,348	-0,648	1,169	315,721	0,000	180,762
200	1	1776	1,380	-0,664	1,194	317,539	0,000	182,716
204	1	1808	1,412	-0,680	1,225	315,115	0,000	184,996

Продолжение таблицы В.13 – Экспериментальные данные (образец 13)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
207	1	1832	1,444	-0,700	1,249	312,692	0,000	189,881
210	1	1856	1,472	-0,712	1,273	307,844	0,000	196,395
213	1	1880	1,500	-0,732	1,294	302,996	0,000	200,304
216	1	1904	1,524	-0,752	1,319	298,148	0,000	204,863
219	1	1928	1,556	-0,768	1,346	301,784	0,000	206,166
222	1	1952	1,584	-0,780	1,371	305,420	0,000	204,863
225	1	1976	1,608	-0,796	1,395	310,874	0,000	204,863
232	2	2034	1,624	-0,808	1,419	290,876	0,000	207,143
238	2	2082	1,596	-0,804	1,444	235,731	0,000	222,451
244	2	2130	1,568	-0,800	1,468	186,645	0,000	231,570
250	2	2178	1,540	-0,800	1,489	141,196	0,000	238,736
256	2	2226	1,508	-0,792	1,516	101,807	0,000	244,273
263	2	2282	1,484	-0,796	1,544	63,023	0,000	246,878
268	2	2322	1,464	-0,792	1,565	46,661	0,000	249,484
271	2	2512	1,424	-0,784	1,600	8,484	0,000	246,878
277	2	2596	1,404	-0,776	1,624	-12,726	0,000	248,832
288	2	2696	1,368	-0,768	1,648	-43,631	0,000	248,832
298	2	2776	1,340	-0,760	1,666	-64,841	0,000	246,552
305	2	2837	1,308	-0,748	1,697	-84,839	0,000	246,878
317	2	2941	1,280	-0,740	1,718	-103,625	0,000	247,204
323	2	2995	1,252	-0,724	1,742	-115,138	0,000	245,250
327	2	3031	1,228	-0,716	1,763	-125,440	0,000	246,552
330	2	3055	1,200	-0,708	1,791	-135,742	0,000	248,507
334	2	3087	1,164	-0,692	1,818	-144,832	0,000	246,227
337	2	3111	1,136	-0,688	1,843	-153,316	0,000	247,530
340	2	3135	1,108	-0,672	1,867	-158,164	0,000	249,809
343	2	3159	1,076	-0,660	1,891	-164,224	0,000	250,461
346	2	3183	1,052	-0,648	1,915	-172,708	0,000	250,461
349	2	3207	1,024	-0,636	1,940	-176,343	0,000	251,764
352	2	3231	0,996	-0,620	1,964	-183,009	0,000	251,112
355	2	3255	0,968	-0,612	1,988	-189,675	0,000	251,438
359	2	3287	0,932	-0,600	2,020	-199,977	0,000	249,809
362	2	3311	0,904	-0,588	2,044	-207,249	0,000	248,507
365	2	3335	0,876	-0,576	2,068	-213,915	0,000	247,530
368	2	3359	0,848	-0,564	2,089	-222,399	0,000	246,227
371	2	3383	0,820	-0,548	2,117	-227,247	0,000	245,575
374	2	3407	0,792	-0,540	2,141	-233,307	0,000	244,273
377	2	3431	0,764	-0,524	2,162	-239,367	0,000	243,295
381	2	3463	0,728	-0,512	2,197	-243,609	0,000	244,273
382	2	3471	0,720	-0,504	2,203	-244,215	0,000	243,947
383	2	3479	0,708	-0,504	2,210	-248,456	0,000	243,621

Таблица В.14– Экспериментальные данные (образец 14)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	1	260	0,020	-0,008	0,031	38,241	0,000	38,211
19	1	343	0,052	-0,012	0,049	102,175	0,000	59,724
31	1	439	0,084	-0,020	0,073	170,889	0,000	90,871
44	1	543	0,112	-0,028	0,097	228,848	0,000	117,843
56	1	639	0,140	-0,048	0,118	239,603	0,451	124,587
68	1	735	0,168	-0,076	0,146	240,201	0,000	126,513
80	1	831	0,196	-0,152	0,174	244,383	0,000	122,339
92	1	927	0,228	-0,184	0,194	253,944	0,000	114,311
105	1	1031	0,252	-0,208	0,222	256,334	0,000	113,669
118	1	1135	0,284	-0,220	0,250	259,919	0,000	110,779
130	1	1231	0,316	-0,228	0,274	266,491	0,000	109,495
143	1	1335	0,344	-0,244	0,291	234,226	0,000	123,944
154	1	1423	0,368	-0,248	0,323	224,665	0,000	138,073
167	1	1527	0,404	-0,256	0,347	224,068	0,000	135,504
179	1	1623	0,428	-0,256	0,368	227,055	0,000	132,614
192	1	1727	0,456	-0,260	0,396	230,641	0,000	137,431
205	1	1831	0,484	-0,260	0,420	221,678	0,000	141,605
216	1	1919	0,512	-0,268	0,441	222,873	0,000	145,779
229	1	2023	0,540	-0,284	0,468	221,080	0,000	153,485
241	1	2119	0,568	-0,296	0,493	225,263	0,000	156,375
254	1	2223	0,600	-0,312	0,517	231,238	0,000	156,054
267	1	2327	0,632	-0,332	0,545	231,836	0,000	160,871
279	1	2423	0,660	-0,344	0,569	236,616	0,000	162,797
291	1	2519	0,684	-0,360	0,590	240,798	0,000	161,513
301	1	2603	0,716	-0,372	0,618	247,371	0,000	162,155
305	1	2638	0,744	-0,384	0,645	253,944	0,000	163,761
308	1	2662	0,772	-0,400	0,670	259,321	0,000	163,118
311	1	2686	0,800	-0,412	0,691	259,919	0,000	163,761
314	1	2710	0,828	-0,428	0,715	262,309	0,000	165,045
317	1	2734	0,856	-0,444	0,739	260,516	0,000	167,935
320	1	2758	0,884	-0,460	0,763	264,101	0,000	170,504
324	1	2790	0,920	-0,480	0,795	267,089	0,451	171,146
327	1	2814	0,948	-0,496	0,822	268,881	0,000	173,394
330	1	2838	0,976	-0,516	0,840	270,674	0,000	175,320
333	1	2862	1,004	-0,528	0,864	273,662	0,000	175,962
336	1	2886	1,032	-0,544	0,888	273,662	0,451	179,495
339	1	2910	1,060	-0,560	0,916	271,869	0,451	183,027
342	1	2934	1,088	-0,580	0,937	276,052	0,000	183,990
345	1	2958	1,116	-0,592	0,965	277,247	0,000	185,917
349	1	2990	1,152	-0,608	0,996	282,027	0,000	185,274
352	1	3014	1,180	-0,628	1,020	286,209	0,000	186,559
355	1	3038	1,208	-0,640	1,044	288,002	0,000	186,880
358	1	3062	1,232	-0,656	1,065	289,794	0,000	186,880
361	1	3086	1,264	-0,672	1,093	292,782	0,000	188,164

Продолжение таблицы В.14 – Экспериментальные данные (образец 14)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
364	1	3110	1,288	-0,692	1,114	293,380	0,000	189,127
367	1	3134	1,316	-0,700	1,138	294,575	0,451	190,412
370	1	3158	1,344	-0,720	1,162	301,147	0,000	189,127
374	1	3190	1,380	-0,732	1,194	305,927	0,000	188,485
377	1	3214	1,408	-0,756	1,221	308,317	0,000	188,806
380	1	3238	1,440	-0,764	1,246	310,707	0,000	189,770
383	1	3262	1,464	-0,780	1,267	311,305	0,000	190,412
386	1	3286	1,492	-0,792	1,291	313,695	0,000	190,091
389	1	3310	1,520	-0,804	1,315	316,683	0,000	190,412
392	1	3334	1,548	-0,816	1,339	319,670	0,000	191,696
395	1	3358	1,576	-0,832	1,360	321,463	0,000	191,375
398	1	3382	1,604	-0,848	1,388	324,450	0,000	192,338
405	2	3442	1,632	-0,868	1,405	317,878	0,451	178,210
411	2	3494	1,632	-0,868	1,371	315,488	0,000	137,431
417	2	3542	1,632	-0,868	1,336	316,085	0,000	96,330
423	2	3590	1,632	-0,872	1,301	309,512	0,000	58,761
430	2	3646	1,632	-0,876	1,267	302,940	0,451	20,229
436	2	3694	1,632	-0,876	1,225	296,965	0,000	-14,771
443	2	3750	1,632	-0,872	1,190	287,404	0,451	-44,633
448	2	3797	1,632	-0,868	1,156	280,234	0,000	-67,110
454	2	3845	1,632	-0,868	1,124	270,076	0,000	-82,201
460	2	3893	1,632	-0,872	1,090	264,101	0,000	-96,009
466	2	3941	1,632	-0,868	1,055	256,334	0,000	-107,889
473	2	3997	1,632	-0,876	1,017	247,968	0,000	-120,091
479	2	4045	1,632	-0,880	0,982	242,591	0,000	-127,798
485	2	4093	1,632	-0,884	0,947	233,031	0,000	-137,431
491	2	4141	1,632	-0,880	0,913	222,873	0,000	-146,421
497	2	4189	1,632	-0,884	0,878	214,508	0,000	-154,449
504	2	4245	1,632	-0,888	0,843	198,375	0,000	-162,155
510	2	4293	1,632	-0,884	0,805	191,205	0,451	-169,219
516	2	4341	1,632	-0,888	0,770	185,827	0,000	-174,678
522	2	4389	1,632	-0,892	0,736	185,229	0,451	-177,889
528	2	4437	1,632	-0,888	0,704	180,449	0,000	-180,458
531	2	4469	1,632	-0,892	0,663	173,877	0,000	-186,238
534	2	4493	1,632	-0,892	0,632	170,292	0,451	-189,770
537	2	4517	1,632	-0,896	0,593	165,512	0,451	-194,265
540	2	4541	1,632	-0,896	0,562	161,329	0,451	-196,513
543	2	4565	1,632	-0,896	0,531	158,341	0,000	-198,760
547	2	4597	1,632	-0,900	0,482	155,951	0,451	-202,614
550	2	4621	1,632	-0,900	0,448	153,561	0,000	-203,898
553	2	4645	1,632	-0,908	0,416	151,171	0,451	-208,072
556	2	4669	1,632	-0,912	0,378	148,781	0,000	-210,962
559	2	4693	1,628	-0,908	0,347	143,403	0,000	-211,283
562	2	4717	1,632	-0,908	0,312	139,818	0,451	-216,100
565	2	4741	1,632	-0,908	0,281	136,831	0,451	-218,669

Продолжение таблицы В.14 – Экспериментальные данные (образец 14)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
568	2	4765	1,632	-0,908	0,246	133,246	0,000	-219,311
571	2	4789	1,632	-0,916	0,212	131,453	0,000	-222,522
574	2	4813	1,632	-0,920	0,177	129,063	0,451	-224,770
578	2	4845	1,632	-0,920	0,135	127,271	0,451	-226,696
581	2	4869	1,632	-0,916	0,097	123,088	0,000	-228,944
584	2	4893	1,632	-0,920	0,066	119,503	0,000	-230,228
587	2	4917	1,636	-0,920	0,031	115,320	0,000	-233,439
590	2	4941	1,632	-0,928	-0,003	112,930	0,451	-236,008
593	2	4965	1,632	-0,924	-0,042	112,333	0,451	-236,008
597	2	4997	1,636	-0,924	-0,083	110,540	0,000	-239,861
600	2	5021	1,632	-0,928	-0,118	108,150	0,000	-240,182
603	2	5045	1,632	-0,928	-0,149	106,358	0,451	-241,467
606	2	5069	1,632	-0,928	-0,184	105,760	0,000	-244,999
609	2	5093	1,632	-0,932	-0,219	102,773	0,000	-247,568
612	2	5117	1,636	-0,936	-0,253	100,980	0,451	-247,568
615	2	5141	1,632	-0,936	-0,285	97,992	0,903	-248,852
618	2	5165	1,632	-0,936	-0,319	96,797	0,000	-249,815
621	2	5189	1,636	-0,936	-0,354	95,005	0,000	-253,026
624	2	5213	1,632	-0,940	-0,389	93,810	0,000	-253,668
628	2	5245	1,632	-0,944	-0,434	91,420	0,451	-255,595
631	2	5269	1,632	-0,944	-0,468	90,225	0,000	-257,843
634	2	5293	1,636	-0,948	-0,500	86,042	0,451	-259,448
637	2	5317	1,632	-0,948	-0,531	75,287	0,451	-258,485
640	2	5341	1,636	-0,952	-0,569	68,714	0,000	-262,659
643	2	5365	1,632	-0,948	-0,604	64,532	0,451	-262,659
647	2	5397	1,632	-0,952	-0,649	62,141	0,000	-264,265
650	2	5421	1,632	-0,952	-0,684	61,544	0,000	-266,834
653	2	5445	1,632	-0,948	-0,715	59,751	0,451	-268,118
656	2	5469	1,632	-0,956	-0,750	58,556	0,451	-269,723
659	2	5493	1,632	-0,960	-0,784	57,959	0,000	-270,687
662	2	5517	1,636	-0,960	-0,819	56,166	0,451	-271,650
665	2	5541	1,632	-0,964	-0,850	54,374	0,451	-272,613
668	2	5565	1,632	-0,964	-0,888	53,776	0,000	-274,219
671	2	5589	1,632	-0,968	-0,923	53,179	0,000	-276,466
675	2	5621	1,632	-0,972	-0,968	52,581	0,451	-277,430
678	2	5645	1,632	-0,976	-0,999	53,776	0,451	-276,466
681	2	5669	1,632	-0,976	-1,034	53,776	0,451	-278,072
684	2	5693	1,632	-0,976	-1,065	52,581	0,451	-278,393
687	2	5717	1,636	-0,988	-1,103	51,386	0,451	-281,925
690	2	5741	1,632	-0,988	-1,131	48,399	0,451	-280,320
693	2	5765	1,632	-0,996	-1,169	46,606	0,451	-282,567
696	2	5789	1,632	-0,996	-1,204	45,411	0,000	-282,567
700	2	5821	1,636	-1,012	-1,249	42,424	0,451	-284,494
703	2	5845	1,632	-1,012	-1,280	40,033	0,451	-286,742
706	2	5869	1,632	-1,024	-1,315	37,643	0,451	-287,705

Продолжение таблицы В.14 – Экспериментальные данные (образец 14)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
709	2	5893	1,632	-1,032	-1,353	38,838	0,451	-288,989
712	2	5917	1,632	-1,040	-1,388	42,424	0,000	-288,668
715	2	5941	1,632	-1,048	-1,419	42,424	0,000	-288,347
718	2	5965	1,632	-1,052	-1,454	42,424	0,451	-291,558
722	2	5997	1,632	-1,068	-1,499	41,826	0,451	-292,200
725	2	6021	1,628	-1,084	-1,530	47,801	0,451	-291,879
728	2	6045	1,632	-1,096	-1,565	53,179	0,451	-293,806
731	2	6069	1,632	-1,108	-1,596	59,154	0,000	-293,806
734	2	6093	1,632	-1,120	-1,634	65,727	0,000	-292,843
737	2	6117	1,632	-1,140	-1,666	73,494	0,000	-293,485
740	2	6141	1,628	-1,152	-1,704	80,067	0,451	-292,843
743	2	6165	1,632	-1,168	-1,735	83,054	0,451	-293,485
746	2	6189	1,632	-1,188	-1,766	83,652	0,451	-293,806

Таблица В.15 – Экспериментальные данные (образец 15)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	1	245	0,028	0,004	0,024	43,782	0,000	27,437
24	1	341	0,052	0,000	0,045	98,509	0,000	55,201
37	1	445	0,084	-0,004	0,076	155,669	0,000	88,517
49	1	541	0,116	-0,004	0,097	201,883	0,000	115,627
61	1	637	0,144	-0,020	0,121	223,774	0,000	131,306
68	1	698	0,172	-0,088	0,132	217,085	0,000	136,532
74	1	764	0,196	-0,180	0,170	176,952	0,000	153,843
79	1	804	0,220	-0,176	0,191	182,425	0,000	153,190
86	1	860	0,252	-0,192	0,219	185,465	0,000	151,557
92	1	908	0,284	-0,196	0,246	186,073	0,460	149,597
98	1	956	0,308	-0,200	0,271	192,762	0,460	147,310
104	1	1004	0,336	-0,208	0,291	203,707	0,460	142,738
111	1	1060	0,368	-0,208	0,319	214,045	0,000	136,532
117	1	1108	0,400	-0,224	0,344	223,166	0,000	130,979
123	1	1156	0,424	-0,224	0,364	228,031	0,000	130,979
129	1	1204	0,452	-0,232	0,392	224,382	0,460	135,552
135	1	1252	0,480	-0,232	0,416	221,950	0,000	142,738
142	1	1308	0,512	-0,232	0,444	214,045	0,460	144,371
148	1	1356	0,540	-0,232	0,468	222,558	0,000	145,024
154	1	1404	0,568	-0,236	0,493	233,503	0,000	142,411
161	1	1460	0,600	-0,248	0,521	240,192	0,460	142,084
167	1	1508	0,628	-0,260	0,545	238,368	0,460	147,310
173	1	1556	0,660	-0,264	0,569	242,625	0,000	147,964
179	1	1604	0,684	-0,272	0,593	248,097	0,460	147,964
185	1	1652	0,712	-0,280	0,618	252,354	0,000	148,617
192	1	1708	0,740	-0,292	0,642	257,827	0,000	149,597

Продолжение таблицы В.15 – Экспериментальные данные (образец 15)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
198	1	1756	0,772	-0,300	0,666	257,827	0,000	151,230
204	1	1804	0,800	-0,328	0,691	258,435	0,000	154,496
210	1	1852	0,828	-0,336	0,715	257,827	0,460	157,109
217	1	1908	0,860	-0,360	0,743	260,867	0,460	160,049
223	1	1956	0,888	-0,380	0,770	262,691	0,460	161,682
229	1	2004	0,912	-0,384	0,791	268,164	0,000	159,069
236	1	2060	0,944	-0,392	0,822	274,245	0,460	160,049
242	1	2108	0,976	-0,416	0,847	273,029	0,460	163,969
248	1	2156	1,004	-0,408	0,871	275,461	0,000	164,622
254	1	2204	1,032	-0,428	0,895	276,069	0,460	166,908
261	1	2260	1,064	-0,432	0,920	280,934	0,460	166,582
266	1	2300	1,084	-0,432	0,940	282,758	0,460	165,275
273	1	2356	1,116	-0,444	0,968	288,231	0,460	164,622
279	1	2404	1,144	-0,444	0,989	289,447	0,460	168,541
285	1	2452	1,172	-0,444	1,017	289,447	0,000	168,868
292	1	2508	1,208	-0,452	1,044	287,623	0,460	174,094
298	1	2556	1,232	-0,456	1,065	283,974	0,460	178,340
304	1	2604	1,260	-0,460	1,093	285,190	0,460	177,687
310	1	2652	1,288	-0,460	1,117	289,447	0,460	177,361
317	1	2708	1,320	-0,460	1,142	296,744	0,460	176,054
323	1	2756	1,348	-0,456	1,169	297,352	0,460	177,687
329	1	2804	1,376	-0,460	1,190	301,001	0,460	176,054
335	1	2852	1,404	-0,456	1,215	304,041	0,460	178,340
342	1	2908	1,436	-0,464	1,242	304,041	0,460	178,340
348	1	2956	1,464	-0,472	1,270	305,257	0,460	181,280
354	1	3004	1,492	-0,460	1,291	307,081	0,000	180,300
360	1	3052	1,520	-0,468	1,319	310,122	0,460	182,587
367	1	3108	1,552	-0,468	1,343	311,338	0,460	182,913
373	1	3156	1,580	-0,460	1,371	313,162	0,460	183,893
379	1	3204	1,608	-0,456	1,391	316,203	0,460	183,240
388	2	3272	1,624	-0,460	1,412	300,392	0,460	179,974
400	2	3368	1,584	-0,464	1,409	241,409	0,460	176,381
413	2	3472	1,544	-0,464	1,412	181,208	0,460	172,134
426	2	3576	1,500	-0,468	1,409	107,631	0,460	171,481
441	2	3696	1,460	-0,460	1,412	42,566	0,460	171,155
449	2	3984	1,416	-0,468	1,412	-14,594	0,460	169,848
454	2	4158	1,380	-0,468	1,412	-59,592	0,460	165,275
461	2	4231	1,340	-0,468	1,412	-97,901	0,460	159,722
473	2	4327	1,300	-0,476	1,412	-130,738	0,460	153,190
485	2	4423	1,256	-0,472	1,412	-159,317	0,460	146,004
498	2	4527	1,216	-0,472	1,412	-185,465	0,460	139,145
511	2	4631	1,176	-0,476	1,412	-205,532	0,460	131,632
523	2	4727	1,136	-0,468	1,409	-223,166	0,460	124,120
535	2	4823	1,096	-0,468	1,412	-237,152	0,460	117,587
547	2	4919	1,056	-0,460	1,412	-249,314	0,460	110,728

Продолжение таблицы В.15 – Экспериментальные данные (образец 15)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
560	2	5023	1,016	-0,468	1,412	-262,083	0,460	105,175
572	2	5119	0,972	-0,472	1,412	-276,069	0,460	99,949
584	2	5215	0,932	-0,476	1,412	-285,798	0,460	97,336
597	2	5319	0,892	-0,472	1,412	-291,271	0,460	94,070
610	2	5423	0,848	-0,468	1,412	-302,217	0,460	90,150
622	2	5519	0,812	-0,476	1,412	-309,514	0,460	89,170
635	2	5623	0,772	-0,472	1,412	-316,811	0,460	87,537
647	2	5719	0,728	-0,468	1,412	-321,675	0,460	85,251
660	2	5823	0,688	-0,468	1,412	-327,756	0,460	83,291
672	2	5919	0,648	-0,472	1,416	-333,837	0,460	81,004
684	2	6015	0,608	-0,468	1,412	-339,310	0,460	77,085
696	2	6111	0,568	-0,468	1,412	-344,782	0,460	74,798
709	2	6215	0,528	-0,468	1,412	-349,039	0,460	71,205
722	2	6319	0,484	-0,468	1,412	-355,728	0,460	69,246
734	2	6415	0,448	-0,464	1,416	-356,944	0,460	67,286
747	2	6519	0,404	-0,440	1,412	-362,417	0,460	65,000
759	2	6615	0,364	-0,428	1,409	-367,890	0,460	61,080
772	2	6719	0,320	-0,408	1,409	-371,538	0,460	60,100
784	2	6815	0,284	-0,392	1,412	-373,970	0,460	59,120
796	2	6911	0,240	-0,376	1,412	-379,443	0,460	56,834
809	2	7015	0,196	-0,356	1,409	-382,483	0,460	55,854
821	2	7111	0,156	-0,340	1,412	-389,172	0,460	51,934
834	2	7215	0,116	-0,324	1,412	-390,997	0,460	51,934
846	2	7311	0,080	-0,316	1,412	-394,037	0,460	51,281
859	2	7415	0,036	-0,292	1,412	-397,686	0,460	51,281
871	2	7511	-0,004	-0,280	1,412	-400,118	0,460	48,015
884	2	7615	-0,044	-0,256	1,412	-404,374	0,460	48,341
896	2	7711	-0,084	-0,248	1,412	-408,631	0,460	48,341
909	2	7815	-0,128	-0,220	1,412	-410,455	0,920	46,708
921	2	7911	-0,168	-0,200	1,412	-414,104	0,460	46,382
933	2	8007	-0,204	-0,192	1,412	-414,712	0,460	46,055
946	2	8111	-0,248	-0,180	1,412	-422,617	0,460	43,769
958	2	8207	-0,288	-0,172	1,412	-422,009	0,460	43,115
971	2	8311	-0,328	-0,144	1,412	-425,049	0,460	38,542
983	2	8407	-0,372	-0,140	1,412	-428,090	0,460	39,849
996	2	8511	-0,412	-0,124	1,412	-431,738	0,460	37,889
1008	2	8607	-0,448	-0,112	1,412	-432,954	0,460	35,276
1020	2	8703	-0,492	-0,092	1,412	-435,995	0,460	32,663
1033	2	8807	-0,532	-0,080	1,416	-440,859	0,460	29,723
1046	2	8911	-0,572	-0,072	1,412	-441,467	0,460	26,457
1058	2	9007	-0,612	-0,052	1,412	-443,900	0,460	25,151
1070	2	9103	-0,652	-0,040	1,416	-446,332	0,460	23,517
1083	2	9207	-0,696	-0,028	1,416	-449,372	0,460	19,598
1095	2	9303	-0,736	-0,024	1,412	-450,589	0,460	17,638
1108	2	9407	-0,776	-0,012	1,412	-455,453	0,460	19,598

Продолжение таблицы В.15 – Экспериментальные данные (образец 15)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1120	2	9503	-0,816	-0,004	1,409	-458,494	0,460	20,251
1132	2	9599	-0,860	0,000	1,412	-459,710	0,460	29,070
1145	2	9703	-0,900	0,004	1,412	-461,534	0,460	42,462
1158	2	9807	-0,940	0,004	1,412	-462,142	0,460	47,688
1170	2	9903	-0,984	0,004	1,412	-464,575	0,460	48,341
1177	2	9970	-1,020	0,000	1,412	-469,439	0,460	48,015
1179	2	9986	-1,044	0,000	1,412	-470,655	0,460	46,382
1181	2	10007	-1,104	-0,004	1,412	-474,912	0,460	45,075
1183	2	10023	-1,160	0,008	1,412	-477,344	0,460	43,115
1184	2	10031	-1,184	0,012	1,412	-478,560	0,460	43,115
1186	2	10047	-1,236	0,008	1,412	-480,993	0,460	43,442
1187	2	10055	-1,264	0,004	1,412	-481,601	0,460	42,462
1188	2	10070	-1,308	0,008	1,412	-482,817	0,460	40,502
1190	2	10086	-1,360	0,004	1,412	-484,641	0,460	38,542
1191	2	10094	-1,380	0,008	1,412	-484,033	0,460	36,909
1193	2	10124	-1,392	-0,004	1,346	-451,805	0,460	67,286

Таблица В.16 – Экспериментальные данные (образец 16)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	1	308	0,024	-0,012	0,024	44,519	0,000	22,305
20	1	409	0,052	-0,016	0,042	99,265	0,000	39,114
33	1	513	0,084	-0,024	0,069	158,824	-0,455	64,328
45	1	609	0,112	-0,036	0,094	208,156	0,000	93,744
57	1	705	0,140	-0,052	0,121	250,870	-0,455	116,373
68	1	801	0,164	-0,080	0,146	251,472	0,000	111,524
74	1	851	0,192	-0,112	0,167	267,113	0,000	99,240
77	1	875	0,220	-0,164	0,191	269,520	0,000	97,947
80	1	899	0,248	-0,200	0,215	262,902	0,000	103,442
84	1	931	0,288	-0,244	0,250	234,627	0,000	126,070
87	1	955	0,316	-0,252	0,271	226,806	0,000	132,212
89	1	971	0,336	-0,260	0,285	218,383	0,000	137,384
91	1	1019	0,384	-0,272	0,323	175,669	0,000	158,719
93	1	1035	0,396	-0,272	0,344	174,466	0,000	162,598
96	1	1059	0,428	-0,272	0,371	182,287	0,000	160,012
99	1	1083	0,456	-0,280	0,396	197,327	0,455	156,133
102	1	1107	0,484	-0,292	0,416	204,546	0,000	155,810
105	1	1136	0,520	-0,304	0,448	195,522	0,000	162,275
108	1	1160	0,544	-0,316	0,472	205,148	0,000	161,952
111	1	1184	0,572	-0,332	0,496	216,578	0,000	161,305
114	1	1208	0,600	-0,340	0,521	223,798	0,000	160,659

Продолжение таблицы В.16 – Экспериментальные данные (образец 16)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
117	1	1232	0,628	-0,364	0,541	231,619	0,000	158,719
120	1	1256	0,656	-0,376	0,566	237,635	0,000	158,719
123	1	1280	0,684	-0,388	0,590	240,643	0,000	159,042
127	1	1312	0,720	-0,416	0,625	247,260	0,000	160,659
130	1	1336	0,748	-0,432	0,645	250,268	0,000	161,952
133	1	1360	0,776	-0,444	0,673	251,472	0,000	163,891
136	1	1384	0,804	-0,460	0,697	261,699	0,000	160,982
139	1	1408	0,832	-0,472	0,718	267,715	0,000	157,103
142	1	1432	0,860	-0,484	0,743	273,130	0,000	157,103
145	1	1456	0,888	-0,504	0,767	274,934	0,000	158,396
149	1	1488	0,924	-0,524	0,798	274,934	0,000	161,952
152	1	1512	0,952	-0,536	0,822	277,341	0,000	163,891
155	1	1536	0,980	-0,548	0,847	276,739	0,000	166,477
158	1	1560	1,008	-0,564	0,871	279,146	0,000	167,124
161	1	1584	1,032	-0,576	0,895	280,950	0,000	169,710
164	1	1608	1,064	-0,596	0,916	283,958	0,000	169,710
167	1	1632	1,092	-0,612	0,944	284,560	0,000	170,680
170	1	1656	1,120	-0,628	0,968	284,560	0,000	174,559
173	1	1680	1,144	-0,640	0,992	287,568	0,000	173,589
177	1	1712	1,176	-0,664	1,024	294,787	0,000	173,266
180	1	1736	1,208	-0,680	1,048	296,592	0,000	173,589
183	1	1760	1,236	-0,688	1,065	298,397	0,000	172,942
186	1	1784	1,264	-0,708	1,093	295,991	0,000	178,438
189	1	1808	1,292	-0,728	1,117	297,795	0,000	179,084
192	1	1832	1,320	-0,748	1,145	298,397	0,000	180,701
195	1	1856	1,348	-0,764	1,169	300,803	0,000	181,024
198	1	1880	1,376	-0,780	1,190	303,210	0,000	181,024
202	1	1912	1,412	-0,796	1,221	308,624	0,000	180,377
205	1	1936	1,440	-0,808	1,246	312,234	0,000	180,377
208	1	1960	1,472	-0,828	1,273	314,640	0,000	181,670
211	1	1984	1,496	-0,848	1,294	314,640	0,000	180,377
214	1	2008	1,524	-0,860	1,319	315,844	0,000	182,640
217	1	2032	1,552	-0,876	1,343	318,250	0,000	182,317
220	1	2056	1,580	-0,892	1,371	320,656	0,000	184,580
226	1	2105	1,612	-0,908	1,398	321,860	0,000	182,640
234	2	2168	1,632	-0,924	1,423	317,047	0,000	185,226
246	2	2264	1,628	-0,932	1,457	292,983	0,000	198,480
259	2	2368	1,632	-0,940	1,496	271,325	0,000	208,501
272	2	2472	1,632	-0,944	1,530	251,472	0,000	217,229
284	2	2568	1,636	-0,952	1,565	231,619	0,000	225,310
291	2	2630	1,632	-0,956	1,603	211,164	0,000	233,068
297	2	2678	1,632	-0,964	1,638	196,124	0,000	237,271
303	2	2726	1,632	-0,968	1,669	181,084	0,000	240,180
309	2	2774	1,632	-0,976	1,704	170,856	0,000	245,352
316	2	2830	1,632	-0,992	1,742	157,621	0,000	248,261

Продолжение таблицы В.16 – Экспериментальные данные (образец 16)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
322	2	2878	1,632	-1,000	1,780	149,199	0,000	251,494
328	2	2926	1,632	-1,008	1,815	144,987	0,000	255,373
334	2	2974	1,628	-1,016	1,846	140,776	0,000	256,343
341	2	3030	1,632	-1,024	1,884	129,947	0,000	256,343
347	2	3078	1,632	-1,028	1,919	115,509	0,000	259,899
353	2	3126	1,636	-1,028	1,954	103,476	0,000	262,161
359	2	3174	1,632	-1,044	1,988	95,054	0,000	264,424
366	2	3230	1,632	-1,052	2,026	91,444	0,000	266,040
372	2	3278	1,632	-1,064	2,061	88,436	0,000	266,040
378	2	3326	1,632	-1,076	2,096	86,631	0,000	267,657
384	2	3374	1,632	-1,088	2,131	83,022	0,000	269,596
389	2	3414	1,632	-1,100	2,158	82,420	0,000	270,889
390	2	3422	1,632	-1,104	2,162	81,819	0,000	270,889
391	2	3430	1,632	-1,108	2,169	82,420	0,455	273,152
392	2	3438	1,632	-1,108	2,172	80,615	0,000	270,889

Таблица В.17 – Экспериментальные данные (образец 17)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	1	294	0,020	-0,004	0,024	41,842	0,451	28,921
29	1	638	0,052	-0,008	0,045	112,974	0,000	53,022
76	1	1014	0,080	-0,020	0,069	175,737	0,000	81,301
90	1	1128	0,104	-0,012	0,090	231,328	0,000	114,721
102	1	1224	0,136	-0,016	0,115	243,880	0,000	120,505
108	1	1276	0,164	-0,012	0,139	235,512	0,451	128,218
115	1	1332	0,192	-0,008	0,167	233,121	0,000	131,110
121	1	1380	0,220	-0,016	0,191	228,937	0,451	136,894
127	1	1428	0,248	-0,012	0,219	223,557	0,000	137,858
134	1	1484	0,280	-0,012	0,246	224,752	0,000	137,858
140	1	1532	0,308	-0,016	0,267	213,993	0,000	133,681
146	1	1580	0,336	-0,020	0,291	225,948	0,451	138,501
151	1	1620	0,356	-0,012	0,305	219,970	0,000	138,822
154	1	1651	0,388	-0,012	0,337	215,188	0,000	142,357
158	1	1685	0,424	-0,020	0,364	216,384	0,000	139,465
164	1	1733	0,452	-0,024	0,392	221,166	0,000	143,000
170	1	1781	0,480	-0,020	0,420	229,534	0,000	147,177
176	1	1829	0,512	-0,028	0,441	233,121	0,000	144,928
182	1	1877	0,536	-0,024	0,462	239,098	0,000	147,499
189	1	1933	0,568	-0,028	0,493	242,685	0,000	151,034
195	1	1981	0,596	-0,028	0,517	247,467	0,000	151,034
201	1	2029	0,624	-0,024	0,541	251,651	0,000	149,105

Продолжение таблицы В.17 – Экспериментальные данные (образец 17)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
208	1	2085	0,656	-0,028	0,566	255,237	0,000	151,676
212	1	2124	0,684	-0,028	0,590	257,031	0,451	155,854
215	1	2148	0,712	-0,024	0,614	255,835	0,451	159,067
218	1	2172	0,740	-0,028	0,638	253,444	0,000	162,602
221	1	2196	0,768	-0,028	0,663	252,249	0,451	167,422
224	1	2220	0,792	-0,028	0,687	249,260	0,000	173,528
228	1	2252	0,832	-0,028	0,718	245,673	0,000	179,955
231	1	2276	0,856	-0,028	0,746	249,260	0,000	180,598
234	1	2300	0,884	-0,024	0,767	253,444	0,000	178,669
237	1	2324	0,912	-0,024	0,791	261,215	0,000	179,633
240	1	2348	0,944	-0,024	0,815	265,997	0,000	178,669
243	1	2372	0,968	-0,024	0,840	270,779	0,000	178,348
246	1	2396	0,996	-0,024	0,861	274,963	0,000	178,027
249	1	2420	1,024	-0,028	0,888	276,756	0,451	178,991
253	1	2452	1,060	-0,028	0,916	285,125	0,000	178,027
256	1	2476	1,088	-0,024	0,940	288,711	0,000	178,669
259	1	2500	1,116	-0,028	0,965	291,102	0,000	177,705
262	1	2524	1,144	-0,024	0,989	295,286	0,000	177,063
265	1	2548	1,172	-0,024	1,013	298,873	0,000	177,063
268	1	2572	1,200	-0,024	1,041	303,655	0,000	178,669
271	1	2596	1,228	-0,024	1,062	306,644	0,000	176,099
275	1	2628	1,264	-0,024	1,093	310,230	0,000	176,420
278	1	2652	1,292	-0,032	1,121	313,219	0,000	179,312
281	1	2676	1,324	-0,028	1,145	315,610	0,000	176,420
284	1	2700	1,348	-0,028	1,166	315,610	0,000	178,348
287	1	2724	1,376	-0,024	1,194	316,805	0,000	182,526
290	1	2748	1,404	-0,032	1,215	318,598	0,000	184,132
293	1	2772	1,428	-0,032	1,239	320,989	0,451	181,883
296	1	2796	1,460	-0,028	1,263	323,380	0,000	181,883
299	1	2820	1,484	-0,028	1,287	325,771	0,000	184,132
303	1	2852	1,524	-0,028	1,315	326,967	0,000	183,811
306	1	2876	1,552	-0,032	1,343	325,771	0,000	189,274
309	1	2900	1,576	-0,032	1,367	325,174	0,000	188,953
312	1	2924	1,608	-0,028	1,391	328,760	0,451	188,953
317	2	2964	1,632	-0,028	1,416	323,978	0,451	186,382
323	2	3014	1,604	-0,024	1,391	265,997	0,000	155,854
330	2	3070	1,572	-0,028	1,364	206,820	0,451	125,968
336	2	3118	1,544	-0,028	1,339	158,403	0,000	97,047
342	2	3166	1,516	-0,032	1,312	114,169	0,000	65,555
348	2	3214	1,488	-0,028	1,291	74,718	0,451	37,276
355	2	3270	1,456	-0,032	1,263	32,876	0,000	18,317
363	2	3356	1,436	-0,036	1,235	7,771	0,451	2,892
386	2	3830	1,408	-0,036	1,211	-11,357	0,000	-9,640
401	2	3950	1,376	-0,036	1,190	-41,842	0,000	-15,103
409	2	4021	1,344	-0,036	1,166	-65,752	0,000	-27,636

Продолжение таблицы В.17 – Экспериментальные данные (образец 17)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
415	2	4069	1,316	-0,036	1,145	-84,282	0,451	-33,420
421	2	4117	1,288	-0,036	1,121	-99,226	0,000	-40,490
428	2	4173	1,256	-0,040	1,093	-114,169	0,000	-48,524
432	2	4206	1,232	-0,040	1,072	-123,733	0,000	-55,272
435	2	4230	1,204	-0,040	1,044	-132,700	0,000	-62,020
438	2	4254	1,176	-0,044	1,024	-139,275	0,000	-69,732
442	2	4286	1,140	-0,036	0,992	-149,436	0,451	-76,481
445	2	4312	1,108	-0,040	0,965	-157,805	0,451	-83,229
448	2	4336	1,080	-0,044	0,944	-159,000	0,451	-89,977
451	2	4360	1,056	-0,040	0,916	-161,989	0,000	-98,011
454	2	4384	1,028	-0,040	0,895	-163,185	0,000	-105,402
457	2	4408	1,000	-0,040	0,871	-163,782	0,000	-112,150
460	2	4432	0,972	-0,040	0,847	-167,967	0,000	-115,685
463	2	4456	0,948	-0,044	0,819	-175,140	0,000	-118,577
466	2	4480	0,916	-0,040	0,798	-181,715	0,451	-119,863
470	2	4512	0,880	-0,036	0,767	-185,899	0,000	-125,004
473	2	4536	0,852	-0,040	0,743	-189,485	0,902	-127,575
476	2	4560	0,824	-0,044	0,718	-194,865	0,000	-129,825
479	2	4584	0,796	-0,048	0,694	-198,452	0,000	-132,395
482	2	4608	0,768	-0,040	0,670	-200,843	0,000	-136,894
485	2	4632	0,740	-0,048	0,645	-202,636	0,000	-138,180
488	2	4656	0,712	-0,044	0,621	-206,222	0,000	-141,072
492	2	4688	0,676	-0,040	0,590	-215,188	0,451	-141,714
495	2	4712	0,648	-0,040	0,562	-221,764	0,000	-143,000
498	2	4736	0,620	-0,040	0,541	-225,350	0,451	-144,607
501	2	4760	0,592	-0,040	0,514	-229,534	0,451	-145,249
504	2	4784	0,568	-0,036	0,493	-233,719	0,000	-147,499
507	2	4808	0,540	-0,040	0,468	-234,316	0,000	-148,784
510	2	4832	0,512	-0,040	0,444	-239,098	0,000	-150,391
513	2	4856	0,480	-0,040	0,423	-240,294	0,451	-153,283
516	2	4880	0,456	-0,044	0,399	-239,098	0,451	-157,139
520	2	4912	0,420	-0,036	0,364	-245,076	0,000	-158,746
523	2	4936	0,392	-0,044	0,340	-248,064	0,000	-159,389
526	2	4960	0,360	-0,044	0,319	-251,651	0,451	-160,353
529	2	4984	0,332	-0,036	0,295	-252,846	0,451	-162,923
532	2	5008	0,308	-0,036	0,271	-254,640	0,451	-162,923
535	2	5032	0,280	-0,044	0,246	-257,628	0,451	-166,780
538	2	5056	0,252	-0,040	0,222	-257,031	0,000	-167,422
541	2	5080	0,220	-0,040	0,194	-260,617	0,451	-170,957
545	2	5112	0,184	-0,040	0,167	-264,801	0,451	-171,600
548	2	5136	0,160	-0,036	0,142	-266,595	0,451	-174,813
551	2	5160	0,132	-0,040	0,118	-265,997	0,451	-176,741
554	2	5184	0,104	-0,040	0,094	-268,388	0,451	-179,312
557	2	5208	0,076	-0,044	0,069	-268,388	0,451	-182,847
560	2	5232	0,048	-0,040	0,045	-270,181	0,451	-183,168

Продолжение таблицы В.17 – Экспериментальные данные (образец 17)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
563	2	5256	0,020	-0,040	0,021	-274,963	0,000	-182,847
566	2	5280	-0,004	-0,040	-0,003	-279,147	0,451	-183,811
570	2	5312	-0,044	-0,040	-0,035	-283,929	0,451	-183,811
573	2	5336	-0,072	-0,040	-0,059	-285,125	0,000	-185,096
576	2	5360	-0,100	-0,040	-0,083	-289,309	0,000	-184,775
579	2	5384	-0,128	-0,044	-0,108	-291,700	0,000	-186,703
582	2	5408	-0,156	-0,040	-0,132	-293,493	0,000	-187,667
585	2	5432	-0,188	-0,044	-0,156	-293,493	0,451	-188,631
588	2	5456	-0,216	-0,040	-0,177	-290,504	0,000	-192,809
591	2	5480	-0,240	-0,044	-0,201	-292,895	0,451	-194,094
594	2	5504	-0,268	-0,044	-0,226	-295,286	0,451	-192,809
598	2	5536	-0,300	-0,044	-0,260	-303,655	0,451	-191,845
601	2	5560	-0,332	-0,048	-0,281	-302,459	0,451	-196,022
604	2	5584	-0,356	-0,084	-0,305	-300,068	0,451	-197,950
607	2	5608	-0,388	-0,104	-0,330	-305,448	0,000	-196,344
610	2	5632	-0,412	-0,104	-0,354	-312,023	0,451	-194,737
613	2	5656	-0,440	-0,092	-0,378	-316,805	0,451	-194,415
616	2	5680	-0,468	-0,084	-0,403	-322,783	0,451	-194,737
620	2	5712	-0,504	-0,064	-0,434	-326,967	0,451	-192,166
623	2	5736	-0,536	-0,056	-0,458	-329,956	0,451	-192,166
626	2	5760	-0,560	-0,048	-0,482	-335,933	0,000	-191,523
629	2	5784	-0,592	-0,040	-0,507	-337,129	0,000	-191,202
632	2	5808	-0,616	-0,028	-0,531	-340,715	0,451	-194,094
635	2	5832	-0,644	-0,016	-0,555	-341,313	0,000	-195,058
638	2	5856	-0,672	-0,008	-0,579	-343,106	0,000	-193,130
641	2	5880	-0,700	0,004	-0,600	-345,497	0,451	-196,344
645	2	5912	-0,736	0,016	-0,635	-340,117	0,451	-201,806
648	2	5936	-0,764	0,028	-0,656	-342,508	0,451	-203,092
651	2	5960	-0,792	0,040	-0,684	-340,715	0,451	-205,663
654	2	5984	-0,820	0,056	-0,704	-344,301	0,000	-203,413
657	2	6008	-0,848	0,068	-0,732	-346,692	0,000	-205,020
660	2	6032	-0,876	0,076	-0,753	-347,888	0,000	-204,699
663	2	6056	-0,904	0,092	-0,777	-349,083	0,451	-205,663
666	2	6080	-0,928	0,104	-0,802	-348,486	0,000	-208,233
670	2	6112	-0,968	0,120	-0,833	-350,877	0,000	-210,162
673	2	6136	-0,996	0,140	-0,857	-353,268	0,000	-209,840
676	2	6160	-1,024	0,148	-0,885	-353,865	0,000	-210,162
679	2	6184	-1,052	0,168	-0,906	-356,854	0,451	-210,804
682	2	6208	-1,080	0,180	-0,930	-358,647	0,000	-212,732
685	2	6232	-1,108	0,196	-0,954	-361,038	0,000	-211,447
688	2	6256	-1,132	0,212	-0,979	-364,027	0,451	-212,090
691	2	6280	-1,160	0,228	-1,003	-367,614	0,000	-209,519
694	2	6304	-1,188	0,236	-1,027	-370,005	0,451	-210,804
698	2	6336	-1,228	0,264	-1,058	-375,982	0,000	-208,233
701	2	6360	-1,256	0,280	-1,083	-378,373	0,000	-208,876

Продолжение таблицы В.17 – Экспериментальные данные (образец 17)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
704	2	6384	-1,280	0,300	-1,110	-378,971	0,451	-210,804
707	2	6408	-1,308	0,312	-1,131	-381,362	0,451	-211,447
710	2	6432	-1,340	0,328	-1,152	-376,580	0,000	-215,624
713	2	6456	-1,368	0,352	-1,180	-372,993	0,000	-219,159
716	2	6480	-1,392	0,368	-1,204	-378,971	0,000	-215,303
719	2	6504	-1,420	0,392	-1,228	-383,753	0,451	-214,339
722	2	6528	-1,448	0,404	-1,253	-386,144	0,000	-213,696
725	2	6552	-1,480	0,420	-1,277	-395,110	0,000	-208,876
729	2	6584	-1,512	0,448	-1,308	-397,501	0,451	-209,197
732	2	6608	-1,540	0,472	-1,329	-399,892	0,000	-208,555
735	2	6632	-1,568	0,488	-1,353	-397,501	0,451	-210,162
738	2	6656	-1,596	0,504	-1,378	-396,305	0,451	-209,840
741	2	6680	-1,624	0,512	-1,405	-396,903	0,451	-213,054
744	2	6704	-1,652	0,524	-1,426	-397,501	0,451	-211,447

Таблица В.18 – Экспериментальные данные (образец 18)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	1	351	0,024	-0,012	0,021	53,971	0,000	31,343
23	1	455	0,052	-0,016	0,049	127,173	0,000	74,357
35	1	551	0,080	-0,020	0,073	192,931	0,000	105,367
45	1	631	0,108	-0,024	0,094	231,393	0,000	129,374
52	1	695	0,140	-0,084	0,121	229,532	0,000	131,708
57	1	735	0,164	-0,148	0,142	221,467	0,000	134,709
61	1	768	0,200	-0,180	0,174	233,254	0,000	128,374
64	1	792	0,228	-0,192	0,198	234,495	0,000	127,040
67	1	816	0,260	-0,204	0,222	236,976	0,000	126,040
70	1	840	0,280	-0,204	0,243	237,596	0,000	122,372
73	1	864	0,320	-0,204	0,271	246,902	0,000	121,705
76	1	888	0,340	-0,208	0,295	235,115	0,000	128,040
79	1	912	0,364	-0,212	0,316	236,976	0,000	127,374
83	1	944	0,404	-0,212	0,350	245,661	0,000	122,372
86	1	968	0,428	-0,212	0,371	248,763	0,000	120,705
89	1	992	0,456	-0,220	0,396	253,105	0,000	123,039
92	1	1016	0,488	-0,228	0,420	254,966	0,000	126,040
95	1	1040	0,512	-0,236	0,444	254,966	0,000	131,041
98	1	1064	0,540	-0,252	0,468	257,448	0,000	133,042
101	1	1088	0,568	-0,264	0,489	261,790	0,000	136,043
105	1	1120	0,604	-0,284	0,524	260,549	0,000	140,044
108	1	1144	0,632	-0,304	0,552	266,133	0,468	141,711
111	1	1168	0,660	-0,316	0,573	272,336	0,000	140,044

Продолжение таблицы В.18 – Экспериментальные данные (образец 18)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
114	1	1192	0,688	-0,332	0,597	276,679	0,000	140,378
117	1	1216	0,716	-0,344	0,621	279,160	0,000	142,045
120	1	1240	0,744	-0,364	0,645	289,706	0,000	137,377
123	1	1264	0,772	-0,380	0,670	290,947	0,000	140,378
126	1	1288	0,800	-0,392	0,691	294,669	0,000	140,044
129	1	1312	0,828	-0,408	0,715	293,428	0,000	144,046
133	1	1344	0,864	-0,432	0,746	293,428	0,000	147,713
136	1	1368	0,892	-0,448	0,770	295,910	0,000	149,381
139	1	1392	0,920	-0,460	0,798	298,391	0,000	151,381
142	1	1416	0,948	-0,472	0,819	297,150	0,000	154,716
145	1	1440	0,976	-0,488	0,843	294,669	0,000	159,384
148	1	1464	1,004	-0,504	0,868	297,150	0,468	159,384
151	1	1488	1,032	-0,520	0,892	300,873	0,468	162,051
155	1	1520	1,068	-0,540	0,923	301,493	0,000	163,052
158	1	1544	1,096	-0,556	0,947	305,215	0,000	163,385
161	1	1568	1,124	-0,572	0,972	307,076	0,000	165,386
164	1	1592	1,148	-0,588	0,992	309,558	0,000	167,386
167	1	1616	1,180	-0,604	1,020	312,039	0,468	167,386
170	1	1640	1,204	-0,616	1,044	314,520	0,000	168,053
173	1	1664	1,232	-0,636	1,069	317,002	0,000	168,720
176	1	1688	1,264	-0,652	1,093	318,243	0,000	169,053
179	1	1712	1,288	-0,664	1,114	318,863	0,468	171,387
183	1	1744	1,328	-0,684	1,149	322,585	0,000	171,387
186	1	1768	1,356	-0,700	1,173	325,066	0,000	173,055
189	1	1792	1,384	-0,708	1,197	325,687	0,000	173,722
192	1	1816	1,408	-0,720	1,218	328,168	0,468	172,721
195	1	1840	1,436	-0,736	1,242	334,372	0,000	172,054
198	1	1864	1,464	-0,752	1,270	338,714	0,000	171,387
201	1	1888	1,492	-0,760	1,294	340,575	0,000	171,721
204	1	1912	1,520	-0,780	1,315	337,474	0,000	175,722
207	1	1936	1,548	-0,788	1,346	343,057	0,000	169,720
211	1	1968	1,584	-0,808	1,371	354,223	0,000	166,719
216	1	2010	1,612	-0,820	1,395	356,705	0,000	165,386
226	2	2090	1,644	-0,836	1,412	364,769	0,000	160,384
239	2	2194	1,684	-0,852	1,412	382,139	0,000	143,379
247	2	2261	1,728	-0,868	1,416	397,648	0,000	131,041
251	2	2296	1,768	-0,888	1,416	410,676	0,000	119,705
254	2	2320	1,808	-0,904	1,412	418,740	0,000	109,034
257	2	2344	1,844	-0,920	1,412	426,184	0,000	100,032
260	2	2368	1,884	-0,936	1,412	434,249	0,000	93,029
263	2	2392	1,924	-0,960	1,412	439,832	0,000	86,361
267	2	2424	1,976	-0,980	1,412	446,036	0,000	78,358
270	2	2448	2,016	-1,000	1,412	450,378	0,468	72,690
273	2	2472	2,056	-1,020	1,412	454,721	0,000	69,355
276	2	2496	2,092	-1,040	1,412	457,202	0,000	65,687

Продолжение таблицы В.18 – Экспериментальные данные (образец 18)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
279	2	2520	2,132	-1,056	1,412	461,545	0,000	61,019
282	2	2544	2,172	-1,076	1,412	464,647	0,000	59,352
285	2	2568	2,212	-1,092	1,412	469,609	0,000	56,018
288	2	2592	2,252	-1,116	1,412	470,230	0,000	52,350
292	2	2624	2,304	-1,136	1,412	474,572	0,000	49,682
295	2	2648	2,344	-1,156	1,416	477,054	0,000	49,349
298	2	2672	2,384	-1,172	1,416	478,915	0,000	47,348
301	2	2696	2,420	-1,192	1,412	482,016	0,000	45,681
304	2	2720	2,460	-1,212	1,416	483,878	0,000	43,680
307	2	2744	2,500	-1,232	1,412	486,979	0,000	42,347
310	2	2768	2,536	-1,248	1,412	488,840	0,000	41,346
313	2	2792	2,576	-1,268	1,412	490,081	0,468	40,013
316	2	2816	2,616	-1,288	1,412	491,942	0,000	38,345
320	2	2848	2,668	-1,308	1,412	495,664	0,000	37,679
323	2	2872	2,708	-1,332	1,412	497,525	0,000	36,678
326	2	2896	2,748	-1,348	1,412	498,146	0,000	35,344
329	2	2920	2,788	-1,368	1,412	501,248	0,000	33,677
333	2	2952	2,836	-1,392	1,412	501,868	0,000	32,344

Таблица В.19 – Экспериментальные данные (образец 19)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	1	262	0,028	-0,004	0,024	55,284	0,000	30,365
17	1	334	0,048	0,000	0,045	101,773	0,000	49,259
30	1	438	0,084	0,000	0,073	165,853	0,000	87,046
43	1	542	0,112	-0,016	0,097	212,342	0,000	127,195
55	1	638	0,148	-0,032	0,121	210,457	0,475	140,353
62	1	699	0,168	-0,048	0,149	208,572	0,000	143,727
68	1	747	0,200	-0,068	0,170	215,483	0,000	138,666
74	1	795	0,224	-0,092	0,194	213,598	0,475	141,366
80	1	843	0,252	-0,128	0,219	214,855	0,000	140,353
86	1	891	0,280	-0,148	0,243	216,739	0,000	144,065
90	1	930	0,320	-0,160	0,274	217,996	0,000	143,390
93	1	954	0,344	-0,172	0,298	219,252	0,000	144,739
96	1	978	0,372	-0,176	0,323	221,137	0,000	146,764
99	1	1002	0,396	-0,184	0,344	223,022	0,000	146,764
102	1	1026	0,428	-0,200	0,371	229,304	0,000	148,113
105	1	1050	0,452	-0,220	0,392	234,330	0,000	147,776
108	1	1074	0,484	-0,228	0,420	242,497	0,000	149,125
111	1	1098	0,508	-0,248	0,444	245,638	0,000	150,138
114	1	1122	0,540	-0,264	0,468	249,407	0,000	151,825

Продолжение таблицы В.19 – Экспериментальные данные (образец 19)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
118	1	1154	0,576	-0,284	0,500	255,061	0,475	151,825
121	1	1178	0,600	-0,296	0,524	258,831	0,000	152,499
124	1	1202	0,632	-0,308	0,545	262,600	0,000	152,162
127	1	1226	0,660	-0,320	0,569	268,882	0,000	152,162
130	1	1250	0,688	-0,340	0,593	273,280	0,000	151,487
133	1	1274	0,716	-0,356	0,618	278,306	0,000	153,174
136	1	1298	0,740	-0,368	0,642	280,819	0,000	151,825
140	1	1330	0,776	-0,392	0,673	284,588	0,000	152,837
143	1	1354	0,808	-0,400	0,701	289,614	0,000	152,162
151	2	1419	0,800	-0,408	0,691	258,831	0,475	129,557
157	2	1467	0,776	-0,408	0,666	212,342	0,000	112,350
163	2	1515	0,748	-0,408	0,642	167,109	0,475	91,769
170	2	1571	0,716	-0,412	0,614	119,364	0,000	67,140
176	2	1619	0,688	-0,408	0,593	80,413	0,000	45,885
182	2	1667	0,660	-0,400	0,566	43,976	0,000	25,979
189	2	1723	0,636	-0,396	0,541	18,219	0,000	4,386
196	2	1996	0,612	-0,388	0,514	-2,513	0,000	-14,508
213	2	2265	0,576	-0,380	0,489	-35,809	0,000	-25,979
220	2	2323	0,548	-0,368	0,468	-64,708	0,000	-33,064
226	2	2371	0,516	-0,352	0,444	-84,811	0,000	-42,848
232	2	2419	0,488	-0,340	0,420	-104,914	0,000	-49,596
238	2	2467	0,460	-0,320	0,396	-122,505	0,000	-53,645
241	2	2495	0,432	-0,308	0,371	-138,211	0,000	-62,754
244	2	2519	0,404	-0,292	0,347	-150,147	0,000	-70,177
247	2	2543	0,376	-0,272	0,323	-162,083	0,000	-75,912
251	2	2575	0,340	-0,252	0,291	-172,763	0,000	-85,697
254	2	2599	0,312	-0,244	0,271	-184,700	0,475	-86,709
257	2	2627	0,288	-0,228	0,246	-194,123	0,000	-92,107
260	2	2651	0,260	-0,216	0,222	-204,803	0,000	-93,119
263	2	2675	0,232	-0,200	0,198	-212,970	0,000	-98,517
266	2	2699	0,204	-0,180	0,174	-220,509	0,000	-102,903
269	2	2723	0,176	-0,164	0,149	-227,419	0,000	-105,602
273	2	2755	0,136	-0,148	0,118	-235,586	0,000	-111,338
276	2	2779	0,108	-0,132	0,094	-233,701	0,000	-119,098
279	2	2803	0,080	-0,120	0,069	-231,817	0,000	-127,870
282	2	2827	0,052	-0,108	0,049	-234,330	0,000	-131,581
285	2	2851	0,024	-0,092	0,024	-236,214	0,000	-136,980
288	2	2875	0,000	-0,080	0,000	-237,471	0,000	-142,715
291	2	2899	-0,028	-0,064	-0,028	-238,727	0,000	-147,101
294	2	2923	-0,056	-0,048	-0,049	-242,497	0,000	-149,463
297	2	2947	-0,084	-0,040	-0,076	-245,638	0,000	-151,487
301	2	2979	-0,120	-0,020	-0,108	-250,035	0,000	-155,873
304	2	3003	-0,148	-0,008	-0,128	-253,177	0,000	-158,235
307	2	3027	-0,176	0,004	-0,153	-258,831	0,000	-157,560
310	2	3051	-0,204	0,020	-0,177	-265,741	0,000	-158,910

Продолжение таблицы В.19 – Экспериментальные данные (образец 19)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
313	2	3075	-0,232	0,028	-0,205	-268,254	0,000	-159,585
316	2	3099	-0,260	0,044	-0,226	-272,023	0,000	-162,621
319	2	3123	-0,288	0,056	-0,250	-274,536	0,000	-164,308
323	2	3155	-0,328	0,080	-0,281	-283,960	0,000	-162,621
326	2	3179	-0,352	0,092	-0,305	-285,216	0,000	-165,995
329	2	3203	-0,380	0,104	-0,330	-286,473	0,000	-168,694
332	2	3227	-0,408	0,112	-0,354	-290,242	0,000	-169,031
335	2	3251	-0,436	0,128	-0,378	-292,755	0,000	-170,718
338	2	3275	-0,464	0,140	-0,403	-295,268	0,000	-170,381
341	2	3299	-0,492	0,160	-0,427	-299,037	0,000	-173,080
344	2	3323	-0,520	0,168	-0,451	-302,179	0,000	-173,417
347	2	3347	-0,548	0,180	-0,475	-304,691	0,000	-174,430
351	2	3379	-0,584	0,196	-0,507	-309,717	0,000	-176,454
354	2	3403	-0,612	0,216	-0,531	-310,974	0,000	-177,129
357	2	3427	-0,640	0,232	-0,555	-312,858	0,000	-178,478
360	2	3451	-0,664	0,240	-0,579	-317,256	0,000	-177,803
363	2	3475	-0,692	0,256	-0,600	-319,141	0,000	-178,478
366	2	3499	-0,720	0,264	-0,625	-319,769	0,000	-180,840
369	2	3523	-0,748	0,280	-0,649	-325,423	0,000	-180,503
372	2	3547	-0,780	0,292	-0,677	-326,051	0,000	-182,864
376	2	3579	-0,812	0,304	-0,704	-327,936	0,000	-184,889
379	2	3603	-0,844	0,324	-0,729	-334,218	0,000	-183,539
382	2	3627	-0,872	0,340	-0,753	-337,988	0,000	-183,876
385	2	3651	-0,900	0,348	-0,777	-338,616	0,000	-184,889
388	2	3675	-0,928	0,364	-0,802	-339,872	0,000	-186,238
391	2	3699	-0,956	0,376	-0,829	-343,642	0,000	-186,576
394	2	3723	-0,980	0,392	-0,854	-347,411	0,000	-186,913
397	2	3747	-1,008	0,408	-0,878	-352,437	0,000	-186,913
401	2	3779	-1,044	0,428	-0,906	-353,693	0,000	-189,275
404	2	3803	-1,072	0,440	-0,930	-351,180	0,475	-192,649
407	2	3827	-1,100	0,456	-0,954	-353,693	0,000	-193,661
410	2	3851	-1,128	0,480	-0,979	-359,347	0,000	-193,323
413	2	3875	-1,156	0,492	-1,003	-365,630	0,000	-189,949
416	2	3899	-1,184	0,508	-1,027	-373,797	0,000	-186,576
419	2	3923	-1,212	0,528	-1,051	-381,335	0,000	-182,189
423	2	3955	-1,252	0,560	-1,083	-392,644	0,000	-177,466

Таблица В.20 – Экспериментальные данные (образец 20)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	1	360	0,024	-0,020	0,021	30,503	-0,460	20,998
17	1	489	0,056	-0,020	0,049	106,150	-0,460	83,664
28	1	577	0,084	-0,028	0,073	160,445	-0,460	114,833

Продолжение таблицы В.20 – Экспериментальные данные (образец 20)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
41	1	681	0,116	-0,060	0,101	195,828	-0,460	149,283
52	1	771	0,136	-0,156	0,121	177,527	-0,460	158,469
63	1	859	0,168	-0,172	0,142	193,388	-0,460	152,236
70	1	919	0,196	-0,184	0,174	203,759	-0,460	147,314
76	1	967	0,224	-0,188	0,194	213,520	-0,460	144,033
82	1	1015	0,252	-0,196	0,219	218,401	0,000	141,408
86	1	1050	0,292	-0,204	0,250	228,162	-0,460	139,112
89	1	1074	0,312	-0,212	0,271	233,042	-0,460	138,127
92	1	1098	0,344	-0,224	0,295	240,973	-0,460	134,847
95	1	1122	0,372	-0,228	0,326	245,853	-0,460	134,847
98	1	1146	0,396	-0,232	0,344	249,514	-0,460	133,862
101	1	1170	0,428	-0,248	0,375	255,004	-0,460	134,518
105	1	1202	0,464	-0,272	0,399	256,834	0,000	134,518
108	1	1226	0,488	-0,280	0,423	253,784	0,000	143,377
111	1	1250	0,520	-0,300	0,451	255,004	-0,460	146,986
114	1	1274	0,544	-0,304	0,472	254,394	-0,460	150,267
117	1	1298	0,572	-0,324	0,496	254,394	0,000	152,236
120	1	1322	0,600	-0,336	0,517	253,784	-0,460	156,173
123	1	1346	0,632	-0,352	0,545	251,954	0,000	160,438
126	1	1370	0,656	-0,372	0,569	254,394	0,000	160,766
129	1	1394	0,684	-0,384	0,593	258,664	-0,460	162,078
133	1	1426	0,720	-0,400	0,625	262,325	0,000	165,031
136	1	1450	0,752	-0,416	0,649	261,105	0,000	168,312
139	1	1474	0,776	-0,436	0,670	257,444	0,000	170,609
142	1	1498	0,804	-0,448	0,697	263,545	-0,460	170,937
151	2	1569	0,836	-0,468	0,711	273,916	0,000	161,422
159	2	1635	0,884	-0,484	0,711	302,588	0,000	146,658
164	2	1676	0,924	-0,504	0,711	322,110	0,000	131,894
167	2	1700	0,964	-0,524	0,708	337,972	0,000	117,129
170	2	1724	1,004	-0,544	0,711	352,613	0,000	106,630
173	2	1748	1,048	-0,568	0,711	363,594	0,000	96,131
176	2	1772	1,088	-0,588	0,708	373,355	-0,460	86,945
179	2	1796	1,124	-0,608	0,711	381,896	0,000	77,430
182	2	1820	1,164	-0,636	0,711	389,217	0,000	72,181
185	2	1844	1,204	-0,656	0,711	395,317	-0,460	65,947
188	2	1868	1,248	-0,676	0,711	399,588	0,000	60,697
191	2	1892	1,288	-0,696	0,711	406,298	0,460	57,416
195	2	1924	1,328	-0,724	0,708	410,569	-0,460	52,823
198	2	1948	1,368	-0,744	0,711	413,009	0,000	49,542
201	2	1972	1,408	-0,760	0,708	416,059	-0,460	46,589
204	2	1996	1,448	-0,780	0,711	419,720	0,000	44,949
207	2	2020	1,488	-0,804	0,711	423,380	-0,460	41,668
210	2	2044	1,528	-0,824	0,711	427,650	0,000	39,043
213	2	2068	1,572	-0,848	0,711	431,311	-0,460	37,075
217	2	2100	1,620	-0,872	0,711	438,021	-0,460	35,762

Продолжение таблицы В.20 – Экспериментальные данные (образец 20)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
220	2	2124	1,656	-0,892	0,711	436,801	0,000	33,466
223	2	2148	1,696	-0,916	0,711	441,072	0,000	32,153
226	2	2172	1,740	-0,940	0,711	444,122	0,000	32,809
229	2	2196	1,776	-0,964	0,708	447,782	-0,460	29,857
232	2	2220	1,816	-0,980	0,711	449,002	0,000	28,872
235	2	2244	1,856	-1,004	0,711	451,442	-0,460	26,576
238	2	2268	1,896	-1,024	0,711	455,103	-0,460	27,232
242	2	2300	1,944	-1,052	0,711	457,543	-0,460	25,919
245	2	2324	1,984	-1,068	0,711	458,763	-0,460	24,279
248	2	2348	2,024	-1,092	0,715	462,424	-0,460	24,935
251	2	2372	2,068	-1,112	0,711	464,254	-0,460	24,279
254	2	2396	2,104	-1,132	0,711	466,084	-0,460	22,310
257	2	2420	2,140	-1,152	0,711	469,134	-0,460	22,310
260	2	2444	2,184	-1,176	0,711	470,354	-0,460	22,310
263	2	2468	2,224	-1,196	0,711	474,015	-0,460	21,982
266	2	2492	2,260	-1,216	0,715	474,625	-0,460	21,326
270	2	2524	2,312	-1,244	0,711	477,065	-0,460	20,670
273	2	2548	2,352	-1,264	0,711	480,115	0,000	20,014
276	2	2572	2,392	-1,284	0,711	481,335	-0,460	19,358
279	2	2596	2,428	-1,308	0,711	484,386	-0,460	19,358
282	2	2620	2,468	-1,324	0,715	486,826	-0,460	19,358
285	2	2644	2,504	-1,344	0,711	486,826	-0,460	19,029
288	2	2668	2,548	-1,364	0,711	486,826	-0,460	17,717
292	2	2700	2,596	-1,392	0,711	491,706	-0,460	17,389
295	2	2724	2,640	-1,412	0,711	492,926	-0,460	16,733
298	2	2748	2,680	-1,436	0,711	494,147	-0,460	16,405
301	2	2772	2,720	-1,456	0,715	496,587	-0,460	17,061
304	2	2796	2,756	-1,476	0,711	497,807	-0,460	15,749
307	2	2820	2,796	-1,496	0,711	501,467	-0,460	15,092
310	2	2844	2,836	-1,512	0,711	501,467	0,000	15,420
313	2	2868	2,876	-1,536	0,708	502,687	-0,460	13,780
317	2	2900	2,920	-1,564	0,711	503,907	-0,460	13,452
320	2	2924	2,968	-1,580	0,711	505,738	-0,460	13,452
323	2	2948	3,004	-1,604	0,711	507,568	-0,460	12,796
326	2	2972	3,040	-1,628	0,711	507,568	0,000	12,796
329	2	2996	3,084	-1,648	0,715	511,228	-0,460	13,780
332	2	3020	3,120	-1,668	0,711	511,228	-0,460	12,796
335	2	3044	3,164	-1,688	0,711	513,668	-0,460	12,468
338	2	3068	3,204	-1,708	0,711	514,888	-0,460	10,827
341	2	3092	3,240	-1,724	0,711	516,719	-0,460	11,155
345	2	3124	3,292	-1,752	0,711	518,549	0,000	11,811
348	2	3148	3,332	-1,776	0,715	519,159	-0,460	12,139
351	2	3172	3,368	-1,796	0,711	520,379	-0,460	10,827
354	2	3196	3,408	-1,820	0,711	520,379	-0,460	9,187
357	2	3220	3,452	-1,848	0,711	525,259	-0,460	8,202

Продолжение таблицы В.20 – Экспериментальные данные (образец 20)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
360	2	3244	3,488	-1,872	0,711	524,649	-0,460	7,546

Таблица В.21 – Экспериментальные данные (образец 21)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	1	247	0,028	-0,004	0,028	48,758	0,000	32,363
24	1	343	0,056	-0,016	0,052	110,158	0,454	64,079
35	1	431	0,084	-0,032	0,076	161,324	0,000	91,588
47	1	527	0,112	-0,048	0,097	212,491	0,000	118,773
52	1	578	0,148	-0,076	0,104	151,693	0,454	155,020
61	1	653	0,140	-0,064	0,118	122,197	0,000	170,878
70	1	725	0,164	-0,092	0,139	134,838	0,000	169,907
73	1	754	0,192	-0,136	0,167	156,509	0,000	165,700
76	1	778	0,220	-0,160	0,191	163,130	0,000	165,053
80	1	810	0,256	-0,180	0,222	175,771	0,454	159,874
83	1	834	0,284	-0,196	0,246	192,626	0,000	154,049
86	1	858	0,312	-0,216	0,271	208,879	0,000	147,253
89	1	882	0,340	-0,224	0,295	213,093	0,000	145,635
92	1	906	0,372	-0,224	0,319	202,859	0,000	151,784
95	1	930	0,396	-0,224	0,344	204,063	0,000	153,725
98	1	954	0,424	-0,224	0,368	204,665	0,454	151,784
101	1	978	0,452	-0,232	0,392	216,102	0,000	148,871
104	1	1002	0,480	-0,244	0,416	228,141	0,000	144,340
107	1	1026	0,508	-0,252	0,441	237,171	0,000	143,046
111	1	1058	0,540	-0,272	0,472	241,384	0,000	146,605
114	1	1082	0,572	-0,288	0,496	245,598	0,000	147,900
117	1	1106	0,596	-0,304	0,517	246,200	0,000	149,842
120	1	1130	0,628	-0,316	0,545	246,802	0,000	153,078
123	1	1154	0,656	-0,328	0,566	247,404	0,000	155,344
126	1	1178	0,684	-0,340	0,586	248,006	0,000	157,609
129	1	1202	0,708	-0,356	0,614	249,812	0,000	160,522
133	1	1234	0,748	-0,380	0,649	251,618	0,454	162,463
136	1	1258	0,772	-0,392	0,670	255,831	0,000	163,434
139	1	1282	0,800	-0,404	0,694	255,831	0,000	164,405
145	2	1340	0,812	-0,412	0,684	244,996	0,000	131,071
151	2	1388	0,796	-0,416	0,649	235,365	0,000	89,970
155	2	1424	0,788	-0,412	0,614	217,908	0,000	41,425
159	2	1467	0,776	-0,416	0,579	203,461	0,000	0,000
171	2	1563	0,768	-0,412	0,548	197,442	0,000	-33,981
182	2	1651	0,752	-0,412	0,517	183,597	0,000	-59,872
196	2	1764	0,748	-0,416	0,482	167,946	0,000	-80,261

Продолжение таблицы В.21 – Экспериментальные данные (образец 21)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
209	2	1868	0,736	-0,412	0,444	151,693	0,454	-97,737
221	2	1964	0,728	-0,408	0,409	136,042	0,000	-111,330
234	2	2068	0,716	-0,396	0,375	113,168	0,000	-124,598
242	2	2136	0,704	-0,388	0,344	92,099	0,000	-137,220
248	2	2184	0,692	-0,380	0,309	87,284	0,000	-148,224
254	2	2232	0,684	-0,384	0,278	89,090	0,000	-155,991
261	2	2288	0,672	-0,380	0,239	83,070	0,000	-163,434
267	2	2336	0,664	-0,376	0,205	78,254	0,000	-170,878
273	2	2384	0,652	-0,368	0,170	66,817	0,000	-174,761
279	2	2432	0,644	-0,364	0,139	57,788	0,000	-179,616
286	2	2488	0,632	-0,360	0,101	42,739	0,000	-184,147
292	2	2536	0,624	-0,356	0,069	30,700	0,000	-184,147
298	2	2584	0,612	-0,344	0,035	20,467	0,000	-189,325
305	2	2640	0,608	-0,344	-0,003	16,855	0,000	-192,561
311	2	2688	0,600	-0,332	-0,035	10,233	0,000	-192,561
316	2	2736	0,588	-0,328	-0,069	4,816	0,000	-197,092
322	2	2784	0,576	-0,320	-0,104	0,000	0,000	-197,416
328	2	2832	0,564	-0,316	-0,135	-4,816	0,000	-201,623
335	2	2888	0,548	-0,308	-0,174	-12,641	0,000	-204,212
339	2	2926	0,536	-0,300	-0,201	-15,049	0,454	-206,477
342	2	2950	0,528	-0,300	-0,236	-15,651	0,000	-209,714
345	2	2974	0,516	-0,292	-0,267	-16,855	0,000	-212,303
348	2	2998	0,504	-0,284	-0,305	-16,253	0,000	-215,863
352	2	3030	0,492	-0,284	-0,340	-18,661	0,000	-218,775
355	2	3054	0,484	-0,280	-0,375	-21,068	0,454	-221,041
358	2	3078	0,472	-0,268	-0,406	-23,476	0,000	-223,954
361	2	3102	0,464	-0,264	-0,444	-26,486	0,000	-227,190
364	2	3126	0,456	-0,256	-0,475	-31,302	0,000	-229,132
367	2	3150	0,440	-0,252	-0,510	-37,923	0,000	-230,750
370	2	3174	0,432	-0,244	-0,541	-40,933	0,000	-232,368
374	2	3206	0,416	-0,236	-0,583	-43,943	0,000	-235,604
377	2	3230	0,408	-0,232	-0,618	-45,147	0,000	-237,870
380	2	3254	0,396	-0,224	-0,652	-47,555	0,000	-238,193
383	2	3278	0,388	-0,224	-0,684	-48,156	0,000	-240,459
386	2	3302	0,380	-0,216	-0,718	-52,370	0,000	-241,753
389	2	3326	0,368	-0,212	-0,750	-52,370	0,000	-244,990
392	2	3350	0,356	-0,204	-0,784	-55,380	0,454	-244,990
395	2	3374	0,348	-0,200	-0,815	-55,380	0,000	-247,579
398	2	3398	0,336	-0,196	-0,847	-57,186	0,454	-248,226
401	2	3422	0,324	-0,188	-0,885	-58,390	0,000	-251,462
404	2	3446	0,316	-0,184	-0,913	-60,196	0,000	-251,462
408	2	3478	0,304	-0,180	-0,954	-63,205	0,000	-254,375
411	2	3502	0,292	-0,172	-0,989	-63,807	0,000	-253,728
414	2	3526	0,284	-0,164	-1,024	-65,613	0,000	-257,935
417	2	3550	0,272	-0,156	-1,055	-68,021	0,000	-258,582

Продолжение таблицы В.21 – Экспериментальные данные (образец 21)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
420	2	3574	0,264	-0,148	-1,090	-69,225	0,454	-260,524
423	2	3598	0,252	-0,148	-1,121	-71,031	0,000	-260,200
426	2	3622	0,244	-0,144	-1,156	-72,837	0,000	-261,819
429	2	3646	0,232	-0,140	-1,190	-77,050	0,000	-263,113
433	2	3678	0,220	-0,140	-1,232	-80,060	0,000	-263,113
436	2	3702	0,208	-0,132	-1,263	-84,876	0,000	-264,084
439	2	3726	0,200	-0,132	-1,298	-86,682	0,000	-263,437
442	2	3750	0,188	-0,124	-1,329	-92,701	0,000	-264,084
445	2	3774	0,176	-0,120	-1,364	-95,109	0,000	-266,349
448	2	3798	0,168	-0,112	-1,395	-92,099	0,000	-268,938
452	2	3830	0,152	-0,108	-1,440	-90,895	0,000	-270,880
455	2	3854	0,140	-0,104	-1,471	-89,090	0,000	-272,498

Таблица В.22 – Экспериментальные данные (образец 22)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	1	216	0,024	-0,012	0,028	45,496	0,457	43,407
34	1	357	0,052	-0,012	0,049	100,092	0,457	75,718
46	1	453	0,080	-0,020	0,069	157,114	0,457	108,355
58	1	549	0,108	-0,020	0,097	199,577	0,457	135,770
68	1	632	0,136	-0,024	0,121	217,776	0,457	141,971
73	1	676	0,176	-0,024	0,146	239,614	0,457	132,506
76	1	700	0,192	-0,028	0,170	238,401	0,457	133,485
79	1	724	0,224	-0,028	0,194	251,746	0,457	122,062
82	1	748	0,256	-0,024	0,222	245,073	0,457	125,652
85	1	772	0,280	-0,028	0,243	243,860	0,457	129,895
88	1	796	0,304	-0,032	0,264	234,761	0,457	136,423
92	1	828	0,344	-0,032	0,295	222,629	0,457	142,950
95	1	852	0,376	-0,024	0,326	220,202	0,457	145,887
98	1	876	0,400	-0,032	0,344	222,022	0,914	141,645
101	1	900	0,428	-0,028	0,368	225,662	0,457	145,561
104	1	924	0,456	-0,024	0,396	222,022	0,000	146,867
107	1	948	0,484	-0,028	0,416	229,301	0,457	146,214
110	1	972	0,512	-0,028	0,444	229,908	0,457	150,457
113	1	996	0,536	-0,028	0,465	228,695	0,914	151,109
117	1	1028	0,576	-0,028	0,500	236,581	0,457	152,088
120	1	1052	0,600	-0,032	0,521	240,827	0,914	152,415
123	1	1076	0,632	-0,028	0,545	246,893	0,914	152,741
126	1	1100	0,656	-0,028	0,573	245,073	0,457	156,658
129	1	1124	0,684	-0,028	0,597	250,533	0,457	158,616
132	1	1148	0,712	-0,040	0,618	251,140	0,457	157,963

Продолжение таблицы В.22 – Экспериментальные данные (образец 22)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
135	1	1172	0,740	-0,036	0,642	254,173	0,457	161,227
138	1	1196	0,776	-0,028	0,666	259,026	0,457	161,227
142	1	1239	0,812	-0,036	0,701	262,665	0,457	160,248
148	2	1290	0,804	-0,032	0,684	240,220	0,457	128,590
151	2	1314	0,788	-0,032	0,656	207,463	0,457	90,404
154	2	1338	0,768	-0,036	0,625	180,772	0,457	52,872
157	2	1362	0,744	-0,036	0,593	151,048	0,457	18,929
161	2	1397	0,728	-0,036	0,566	122,537	0,457	-15,666
166	2	1471	0,696	-0,036	0,534	89,173	0,457	-41,123
173	2	1527	0,688	-0,040	0,510	81,287	0,457	-54,504
185	2	1631	0,668	-0,036	0,475	63,695	0,000	-72,780
197	2	1727	0,648	-0,040	0,444	48,529	0,457	-86,162
210	2	1831	0,628	-0,040	0,416	35,790	0,457	-98,237
222	2	1927	0,608	-0,040	0,385	23,658	0,914	-109,334
235	2	2031	0,592	-0,040	0,350	17,592	0,457	-121,410
248	2	2135	0,568	-0,044	0,323	4,246	0,457	-128,916
260	2	2231	0,552	-0,044	0,291	-2,426	0,000	-133,485
272	2	2327	0,532	-0,040	0,260	-12,132	0,000	-140,013
284	2	2423	0,512	-0,040	0,229	-26,085	0,457	-142,950
296	2	2519	0,488	-0,044	0,201	-44,890	0,457	-143,929
307	2	2607	0,464	-0,040	0,174	-47,923	0,457	-148,498
320	2	2711	0,444	-0,044	0,139	-50,956	0,457	-157,637
333	2	2815	0,424	-0,044	0,108	-61,875	0,457	-157,963
345	2	2911	0,408	-0,048	0,080	-69,761	0,457	-160,574
357	2	3007	0,388	-0,040	0,052	-72,187	0,000	-166,122
370	2	3111	0,364	-0,048	0,021	-77,647	0,457	-167,754
377	2	3171	0,348	-0,044	-0,007	-81,893	0,457	-173,302
381	2	3203	0,320	-0,048	-0,049	-87,353	0,000	-178,524
384	2	3227	0,300	-0,044	-0,073	-93,419	0,457	-179,503
387	2	3251	0,284	-0,044	-0,104	-95,846	0,457	-182,441
390	2	3275	0,260	-0,048	-0,135	-102,518	0,457	-185,378
393	2	3299	0,244	-0,048	-0,160	-105,551	0,457	-187,010
396	2	3323	0,220	-0,048	-0,191	-109,798	0,457	-188,968
399	2	3347	0,196	-0,044	-0,219	-111,011	0,457	-194,843
402	2	3371	0,180	-0,048	-0,253	-111,618	0,457	-198,107
405	2	3395	0,160	-0,048	-0,278	-112,224	0,457	-200,391
409	2	3427	0,136	-0,044	-0,323	-112,831	0,457	-205,613
412	2	3451	0,120	-0,048	-0,354	-121,323	0,000	-206,592
415	2	3475	0,100	-0,052	-0,382	-134,669	0,457	-203,981
418	2	3499	0,080	-0,048	-0,409	-149,834	0,457	-203,328
421	2	3523	0,060	-0,048	-0,437	-165,607	0,457	-199,412
424	2	3547	0,036	-0,048	-0,468	-173,493	0,457	-199,086
427	2	3571	0,012	-0,048	-0,496	-163,180	0,457	-203,655
430	2	3595	0,000	-0,048	-0,527	-165,607	0,000	-208,224
433	2	3619	-0,024	-0,048	-0,559	-169,853	0,457	-208,550

Продолжение таблицы В.22 – Экспериментальные данные (образец 22)

Точка	Участок	Время, с	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
437	2	3651	-0,048	-0,044	-0,590	-173,493	0,000	-208,224
440	2	3675	-0,064	-0,032	-0,628	-179,559	0,457	-210,509
443	2	3699	-0,084	-0,020	-0,652	-184,412	0,457	-209,530
446	2	3723	-0,108	-0,008	-0,687	-189,265	0,457	-212,140
449	2	3747	-0,128	0,008	-0,715	-194,118	0,457	-212,140
452	2	3771	-0,148	0,016	-0,743	-193,511	0,000	-214,099
455	2	3795	-0,160	0,024	-0,770	-192,298	0,914	-217,362
459	2	3827	-0,188	0,048	-0,809	-195,937	0,000	-218,668
462	2	3851	-0,216	0,056	-0,840	-200,790	0,000	-219,321
465	2	3875	-0,232	0,072	-0,868	-203,823	0,000	-219,973
468	2	3899	-0,252	0,092	-0,902	-209,890	0,457	-221,932
471	2	3923	-0,268	0,104	-0,926	-213,529	0,457	-220,952
474	2	3947	-0,292	0,112	-0,954	-215,349	0,457	-222,258
477	2	3971	-0,308	0,128	-0,989	-216,562	0,457	-225,195
480	2	3995	-0,324	0,140	-1,020	-218,989	0,000	-225,522
483	2	4019	-0,344	0,152	-1,048	-223,235	0,457	-225,522
487	2	4051	-0,372	0,168	-1,083	-227,481	0,457	-225,522
490	2	4075	-0,396	0,180	-1,117	-229,908	0,457	-227,480
493	2	4099	-0,416	0,188	-1,145	-229,908	0,000	-228,459
496	2	4123	-0,436	0,200	-1,173	-228,695	0,457	-230,744
499	2	4147	-0,452	0,208	-1,201	-225,662	0,457	-233,681
502	2	4171	-0,472	0,224	-1,235	-227,481	0,000	-234,007
505	2	4195	-0,492	0,236	-1,263	-228,695	0,000	-236,618
508	2	4219	-0,516	0,248	-1,291	-226,268	0,000	-237,924
511	2	4243	-0,532	0,260	-1,319	-228,088	0,457	-239,882
515	2	4275	-0,560	0,272	-1,357	-234,154	0,000	-239,229
518	2	4299	-0,576	0,288	-1,388	-235,974	0,457	-240,861
521	2	4323	-0,596	0,300	-1,416	-239,007	0,000	-239,882
524	2	4347	-0,612	0,320	-1,450	-241,434	0,000	-241,514
527	2	4371	-0,636	0,324	-1,478	-245,680	0,000	-241,840
530	2	4395	-0,660	0,348	-1,506	-245,073	0,457	-244,451
533	2	4419	-0,676	0,360	-1,534	-247,500	0,000	-244,125
537	2	4451	-0,700	0,380	-1,575	-252,353	0,457	-244,777
540	2	4475	-0,720	0,392	-1,607	-256,599	0,457	-243,798
543	2	4499	-0,736	0,416	-1,634	-256,599	0,457	-245,430
546	2	4523	-0,760	0,432	-1,662	-257,812	0,457	-246,736

Таблица В.23 – Экспериментальные данные (образец 23)

Точка	Участок	Время, сек	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
1	1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	1	208	0,016	-0,008	0,021	40,919	0,454	35,286
23	1	405	0,052	-0,004	0,045	100,491	0,454	70,896
34	1	493	0,076	-0,020	0,069	154,047	0,454	101,651

Продолжение таблицы В.23 – Экспериментальные данные (образец 23)

Точка	Участок	Время, сек	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
47	1	597	0,108	-0,036	0,097	214,221	0,454	124,311
59	1	693	0,140	-0,032	0,125	239,494	0,000	122,693
71	1	789	0,164	-0,016	0,142	232,875	0,000	127,225
77	1	847	0,192	-0,036	0,167	249,122	0,907	127,872
81	1	879	0,224	-0,084	0,198	258,149	0,000	119,456
84	1	903	0,252	-0,096	0,222	261,157	0,454	115,571
87	1	927	0,284	-0,112	0,243	262,963	0,000	112,334
90	1	951	0,308	-0,112	0,271	262,963	0,000	114,600
93	1	975	0,340	-0,112	0,291	264,768	0,454	113,952
96	1	999	0,364	-0,116	0,319	265,369	0,000	114,276
99	1	1023	0,396	-0,112	0,344	265,971	0,000	112,981
102	1	1047	0,424	-0,112	0,364	265,971	0,907	115,247
106	1	1079	0,456	-0,104	0,399	258,149	0,000	121,722
109	1	1103	0,488	-0,108	0,423	257,547	0,000	124,635
112	1	1127	0,516	-0,116	0,444	255,742	0,000	128,520
115	1	1151	0,540	-0,124	0,472	257,547	0,000	130,139
118	1	1175	0,568	-0,128	0,493	261,759	0,000	131,433
121	1	1199	0,596	-0,140	0,517	265,369	0,000	130,139
124	1	1223	0,624	-0,160	0,538	273,794	0,000	130,786
127	1	1247	0,656	-0,172	0,562	272,590	0,000	134,023
131	1	1279	0,688	-0,188	0,597	267,175	0,000	142,116
134	1	1303	0,716	-0,200	0,621	265,971	0,000	146,649
136	1	1319	0,736	-0,208	0,635	265,971	0,000	150,857
140	1	1351	0,772	-0,228	0,670	270,183	0,454	149,886
143	1	1375	0,800	-0,240	0,691	273,192	0,000	151,181
149	2	1431	0,800	-0,248	0,704	241,901	0,454	137,261
156	2	1487	0,756	-0,232	0,694	164,878	0,454	127,549
162	2	1535	0,720	-0,216	0,684	98,084	0,000	117,513
169	2	1597	0,680	-0,204	0,670	30,087	0,000	103,917
186	2	2029	0,640	-0,180	0,663	-25,875	0,000	96,147
197	2	2183	0,608	-0,152	0,663	-64,387	0,000	85,788
208	2	2276	0,568	-0,124	0,649	-108,916	0,000	74,781
217	2	2348	0,528	-0,112	0,642	-141,410	0,000	73,486
223	2	2396	0,488	-0,088	0,632	-164,276	0,000	65,393
229	2	2451	0,444	-0,064	0,621	-191,355	0,000	56,329
232	2	2475	0,404	-0,044	0,614	-208,204	0,000	52,768
235	2	2499	0,364	-0,028	0,604	-223,247	0,454	49,854
238	2	2523	0,324	-0,008	0,593	-236,486	0,454	39,818
241	2	2547	0,288	0,008	0,586	-246,715	0,000	33,020
244	2	2571	0,252	0,028	0,576	-258,750	0,000	27,193
247	2	2595	0,212	0,048	0,569	-267,776	0,000	22,013
250	2	2619	0,180	0,064	0,559	-279,811	0,454	43,379
253	2	2643	0,136	0,084	0,552	-288,236	0,454	26,869
256	2	2667	0,100	0,112	0,545	-296,660	0,454	21,690
260	2	2699	0,048	0,136	0,527	-302,678	0,000	11,007

Продолжение таблицы В.23 – Экспериментальные данные (образец 23)

Точка	Участок	Время, сек	ε_{11} , %	ε_{22} , %	ε_{12} , %	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	σ_{12} , МПа
263	2	2723	0,008	0,148	0,521	-310,500	0,000	5,827
266	2	2747	-0,028	0,164	0,514	-314,111	0,454	1,942
269	2	2771	-0,064	0,188	0,507	-320,730	0,000	-1,295
272	2	2795	-0,100	0,208	0,496	-327,951	0,454	-0,971
275	2	2819	-0,144	0,220	0,486	-332,765	0,454	-3,237
278	2	2843	-0,176	0,248	0,479	-339,384	0,000	-2,914
281	2	2867	-0,212	0,256	0,472	-342,995	0,000	-4,532
285	2	2899	-0,264	0,284	0,458	-349,614	0,000	-7,769
288	2	2923	-0,300	0,304	0,448	-354,428	0,000	-12,302
291	2	2947	-0,344	0,320	0,441	-359,242	0,000	-12,302
294	2	2971	-0,380	0,336	0,430	-362,852	0,000	-12,302
297	2	2995	-0,420	0,360	0,427	-367,666	0,000	-11,654
300	2	3019	-0,456	0,372	0,413	-371,277	0,000	-17,158
303	2	3043	-0,492	0,388	0,403	-374,285	0,000	-18,452
307	2	3075	-0,540	0,416	0,389	-378,498	0,454	-22,013
310	2	3099	-0,580	0,440	0,385	-385,117	0,454	-18,452
313	2	3123	-0,620	0,456	0,375	-389,931	0,000	-20,071
316	2	3147	-0,656	0,484	0,364	-394,745	0,454	-17,481
319	2	3171	-0,692	0,504	0,354	-400,762	0,000	-18,452
322	2	3195	-0,732	0,540	0,347	-409,187	0,000	-14,568
325	2	3219	-0,768	0,580	0,340	-416,407	0,000	-12,949
328	2	3243	-0,804	0,616	0,330	-424,230	0,000	-11,654
332	2	3275	-0,852	0,684	0,319	-436,867	0,454	-9,712

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАЛИ

WORLDWIDE ANALYTICAL SYSTEMS AG
WAS Sample Testing of different Qualities



Результат химического анализа / Chemical Analysis Results

№ образца / Sample ID: Ст45

Марка / Grade:

Ст45 ГОСТ 1050-2013

Дата поставки / Delivery date

№ плавки / Heat number:

36374

№ партии / Batch number:

23

№ садки / Charge number:

Спектральный анализ Foundry Master

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min		0,396	0,165	0,476	0,0000	0,0000	0,0000	
Max		0,524	0,400	0,840	0,0360	0,0420	0,274	
1	98,3	0,450	0,267	0,612	0,0132	0,0114	0,0571	< 0,0050
2	98,3	0,447	0,268	0,621	0,0132	0,0121	0,0594	< 0,0050
3	98,3	0,432	0,269	0,602	0,0116	0,0086	0,0583	0,0064
Ср.	98,3	0,443	0,268	0,612	0,0126	0,0107	0,0583	< 0,0050
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
Min	0,0000			0,0000				
Max	0,330			0,330				
1	0,0231	0,0201	0,0670	0,0378	0,0268	0,0144	0,0093	< 0,0150
2	0,0184	0,0192	0,0725	0,0369	0,0279	0,0098	0,0078	< 0,0150
3	0,0201	0,0210	0,0893	0,0375	0,0203	0,0091	0,0062	< 0,0150
Ср.	0,0205	0,0201	0,0763	0,0374	0,0250	0,0111	0,0078	< 0,0150
	Pb	Sn	B	Zr	As			
Min								
Max								
1	< 0,0100	0,0043	0,0013	0,0249	0,0085			
2	< 0,0100	0,0046	0,0011	0,0260	0,0084			
3	< 0,0100	0,0046	0,0012	0,0237	0,0069			
Ср.	< 0,0100	0,0045	0,0012	0,0249	0,0079			

Дата / Date:

09.10.2021

Инженер / Lab. Engineer:

Ratkevich G

ООО "СКФ" / LLC SKF

Тел./Tel.: +7 (4822) 62 00 11

Факс/Fax: +7 (4822) 62 00 12

Сайт/Web: www.skf.com

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА СТАЛИ



Metalloinvest
 OJSC



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
 "Оскольский электрометаллургический комбинат"
 Joint Stock Company "Oskol electrometallurgical plant"
 Сертификат качества (Свидетельство о приемочном испытании)
 Quality certificate (Inspection certificate)

Лист / Page 1
 Листов / Pages 2

№ 0681655

От / Dated 11.09.19

Inspection certificate EN 10204 3.1

Производитель / Producer
 Акционерное общество "Оскольский электрометаллургический комбинат" 00187895
 Joint Stock Company "Oskol electrometallurgical plant" 00187895
 309515, Россия, Белгородская область, город Старый Оскол, проспект Алексея Угарова, дом 218, здание 2
 JSC "OJSC" pr. Aleksey Ugarova 218/2, 309515 Belgorod region, Starý Oskol, Russia

Грузополучатель / Consignee
 АО "Металлоторг"

УTK / Quality control department
 Телефон / Telephone: (4726) 37-59-40 Факс / Fax: (4726) 37-48-14
 E-mail: sergeev@osmk.ru

Российская Фед. 643
 Russia

Страна производитель / Manufacturer Российская Федерация / Russian Federation
 Страна назначения / Country of destination Российская Фед. / Russia

Вид транспорта / Type of transport Вагон / Railway car
 Транспорт / Transport № 54997564

Контракт / Contract МЛГОЕ-004117
 От / Dated 24.04.2019
 Д / S

От / Dated
 Наш номер заказа/позиции / JSC "OJSC" order/position number 360762 / 017

№ плавки / Heat number 36374
 № партии / Lot number 23

Материал Material	Форма изделия, размеры, мм Shape of production, size, mm	Условия поставки Technical specifications	Масса, т Weight, t	Вид упаковки Package type	Кол-во Quantity	Цветная маркировка Color code
45	KP / Round 52 ОД > 1М 3000-6000	ГОСТ 1050-2013	8.615	пачка / bundle	2	не требуется / not required

Технические требования / Technical requirements

Точность изготовления проката В1
 Номер стандарта на сортмент ГОСТ 2550-2006
 Кривизна, класс кривизны IV
 Группа качества поверхности 2ГП
 Механические свойства M1
 Твердость TB1

Химический состав / Chemical composition

C	%	Si	%	Mn	%	S	%	P	%
0.45		0.24		0.60		0.010		0.008	

Химический состав / Chemical composition

Cr	%	Ni	%	Cu	%	N	%	As	%
0.03		0.03		0.03		0.008		0.002	

Тип испытаний Properties	Наименование испытаний Test type	Ед. изм. Unit of measure	№ пробы No specimen	№ значения No value	Результат испытаний Test result
Механические свойства Mechanical properties	Твердость в состоянии поставки Hardness as delivered	НВ	01	1	150
				2	187
				3	151
	Предел текучести Yield strength	Нкв мм N/mm ²	01	1	430
	Временное сопротивление Tensile strength	Нкв мм N/mm ²	01	1	650
	Относительное удлинение Elongation	%	01	1	22
Макроструктура Macrostructure	Относительное сужение Reduction of area	%	01	1	44
	Общая оценка макроструктуры Macrostructure evaluation		01	1	УД / SATISFACTORY
	Способ выплавки стали Steel melting method		01	1	Электропечь
Дополнительная информация Additional information	Вариант упаковки Package option		01	1	BY-2



Metallinvest
OJSC



Акционерное общество
"Оскольский электрометаллургический комбинат"
Joint Stock Company "Oskol electrometallurgical plant"

Лист / Page 2
Листов / Pages 2

Сертификат качества (Свидетельство о приемочном испытании)
Quality certificate (Inspection certificate)

№ 0681655

От / Dated 11.09.19

Inspection certificate EN 10204 3.1

Подтверждаю, что поставка отвечает требованиям контракта и НД.
Свободно от радиоактивного загрязнения.
We confirm that delivery meets the requirements of contract
and JSC "OJSC" internal standards and regulations.
Free from radioactive contamination.

Контролер в производстве черных металлов / Inspector of Ferrous Industry
Коновова Н.Е. / Kononova N.E.

