

На правах рукописи



**Двужилов Антон Сергеевич**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛАТУНИ Л63 ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ  
ПО ЛОМАННЫМ И ГЛАДКИМ ТРАЕКТОРИЯМ ПОСТОЯННОЙ  
КРИВИЗНЫ**

Научная специальность 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тверь – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ) на кафедре «Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности».

Научный руководитель **Гулятьев Вадим Иванович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильных дорог, оснований и фундаментов» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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

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

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

Защита состоится «27» июня 2024 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.410.03 на базе ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» по адресу: 170026, Россия, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22, ауд. Ц-208.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



**Алексеев  
Андрей Алексеевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность данной работы** состоит в установлении закономерностей упруго-пластического деформирования в опытах использующих траектории сложного нагружения в виде двузвенных ломанных, окружностей и скручивающихся спиралей Архимеда.

**Степень разработанности темы.** Проанализировав научную литературу по данной проблематике можно сделать заключение, о степени ее проработки. Как показывает практика экспериментальных исследований тонкостенных цилиндрических оболочек, материал типа латунь Л63 был мало исследован, особенно при сложном нагружении на многозвенных траекториях, криволинейных траекториях и др. Это убеждает нас, что полученные экспериментальные данные численно согласуются с экспериментами других исследователей, таких как Дж.С. Хараквал, Л.К. Гурджар, Логинов Ю.Н. В отсутствии четких результатов экспериментальных исследований на сложное нагружение было бы невозможно теоретически записать уравнение теории процессов.

**Объектом исследования** являются латунные цилиндрические тонкостенные оболочки, подверженные воздействию осевых переменных нагрузок и крутящего момента.

**Предметом исследования** является оценка напряженно-деформируемого состояния материала латунь Л63 с помощью векторных и скалярных свойств в результате воздействия на оболочку знакопеременных нагрузок и крутящего момента.

**Цель работы:** разработка методики экспериментальных исследований напряженно-деформируемого состояния нагружаемых цилиндрических оболочек из латуни Л63 и экспериментальная проверка функций для  $\varepsilon_{ij}$   $\sigma_{ij}$  при упруго-пластическом деформировании, испытывающего сложное нагружение.

**Основные задачи работы состоят:**

1) В методике проведении экспериментальных исследований на автоматизированном комплексе СЧ-ЭВМ в лаборатории механических испытаний на образцах латуни Л63 по заданным программным траекториям деформирования.

2) Экспериментальное исследование механических свойств материала Л63 в сложных процессах деформирования по программе смещенного веера ломаных плоских траекторий.

3) Экспериментальное исследование механических свойств материала Л63 в процессах деформирования по гладким плоским криволинейным траекториям постоянной кривизны.

4) Графическая реализация отображения расчетных и экспериментальных результатов работы в векторном подпространстве А.А. Ильюшина.

5) Исследование векторных свойств латуни Л63 на двузвенных ломанных траекториях и криволинейных траекториях постоянной и переменной кривизны, установление зависимости между углом сближения и изменением знака кривизны.

**Научная новизна** работы состоит в том, что впервые были получены результаты по установлению закономерностей упруго-пластического деформирования латуни Л63 для траекторий двузвенных ломаных и внецентренных окружностей с постоянной кривизной. Опыты были проведены с помощью автоматизированного комплекса СН-ЭВМ.

**Практическое и теоретическое значение** данной диссертационной работы состоит в использовании экспериментально-теоретических исследований и полученных экспериментальных данных в учебном процессе дисциплин строительная механика, теория упругости, механика грунтов, а так же внедрение на производстве ООО «ПромКонтроль» и других машиностроительных, строительных и конструкторских бюро. Нарботки, полученные в ходе выполнения данной диссертационной работы, внедрены в учебный процесс на кафедре «Сопротивления материалов теории упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета для подготовки аспирантов по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела», а также для подготовки магистров по направлению 08.04.01 «Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог» кафедры «Автомобильных дорог, оснований и фундаментов» Тверского государственного технического университета.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования по двузвенным ломаным и гладким траекториям постоянной кривизны выполнялись на высокоточном, экспериментально-расчётном комплексе СН-ЭВМ им. А.А. Ильюшина на кафедре «Сопротивления материалов, теории упругости и пластичности» Тверского государственного

технического университета. Точность измерения испытываемых образцов соответствует ГОСТам, методики испытаний тонкостенных оболочек полностью удовлетворяют российским стандартам. Обработка экспериментальных данных велась в соответствии с общепринятыми методиками для упруго-пластических процессов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- совокупность методических рекомендаций по реализации различных сложных процессов упруго-пластического деформирования;
- описание плоских двузвенных ломаных и гладких траекторий деформирования, рассмотрение полученных экспериментальных данных;
- утверждение о том, что при рассмотрении двузвенных траекторий в точке излома на диаграмме прослеживаяния процесса имеет место "нырок";
- утверждение о том, что при рассмотрении гладких криволинейных траекторий постоянной кривизны в точках перехода между участками так же присутствует прямой "нырок";
  
- выявлены закономерности векторных и скалярных свойств, выполнен сравнительный анализ векторных свойств между прямолинейными траекториями с углом излома и углом, который образуется при переходе с одной гладкой траектории на другую.

**Достоверность** полученных экспериментальных данных обеспечивается корректным применением средств измерений образцов, использованием уникального высокоточного экспериментального комплекса СН-ЭВМ, расчетом скалярных и векторных свойств по зарекомендованным методикам в теории упруго-пластического деформирования. Необходимо отметить, что полученные результаты соответствуют экспериментальным данным, собранным при реализации экспериментов на других материалах и в других научных школах.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на научной конференции-семинаре «Современные проблемы теории упругости в механике» Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, на научно-исследовательском семинаре по механики деформируемого твердого тела, в Тверском государственном техническом университете, на межвузовском симпозиуме в честь 85-летия Владимира Георгиевича Зубчанинова «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости МДТТ, проведенном в Тверском государственном техническом университете в 2017 году, в Витебском государственном технологическом

университете на Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов в 2023г.

**Личный вклад автора** заключается в разработке и планировании методических вопросов по проведению экспериментальных исследований, непосредственной реализации намеченных программ испытаний различных классов траекторий деформирования, обработке и анализе полученных результатов с учетом общепринятых моделей и параметров. Публикации по теме диссертационной работы в различных научных изданиях.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела» : п.13 (экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях).

**Публикации** По теме диссертации было опубликовано 8 работ. Из них 2 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, 6 статей в прочих рецензируемых журналах и сборниках трудов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 181 наименований, приложения. Работа изложена на 189 страницах, содержит 82 рисунка и 1 таблицу.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** представлены общие проблемы механики деформируемого твердого тела, отражены актуальность данной работы и степень разработанности темы, показаны цель работы и основные задачи, описаны научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен краткий исторический обзор становления теории пластичности и описан процесс формирования различных инженерных школ. Показано, что теория упругопластических процессов, в сравнении с другими теориями, является наглядной и даёт возможность к геометрическому представлению процессов нагружения и деформирования, к опытной проверке основных постулатов, к простоте математических формулировок.

Во **второй главе** отражены основные положения теории пластичности. Теория пластичности начала свое существование с момента появления трудов инженера из Франции Треска в 1864 г. В них он выполнил анализ своих

экспериментов выдавливания и истечению свинцовых заготовок через отверстия и выдвинул гипотезу о том, что достигая предельного касательного напряжения, какого-то максимально предельного максимального постоянного значения  $k$  возникает пластическое течение, т.е.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2} = k \quad (i \neq j, i > j), \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные нормальные напряжения. Это условие называют условием пластичности Треска.

В 1870 г. Сен-Венан построил первую математическую теорию пластичности для случая идеального пластического течения и плоской деформации. Сен-Венан считал упругие деформации  $\varepsilon_{ij}^e$  малыми и пренебрегал ими, по сравнению с пластическими деформациями  $\varepsilon_{ij}^p$ , т.е.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \approx \varepsilon_{ij}^p. \quad (2)$$

Рассматривая плоскую деформацию, Сен-Венан обозначил закон пластического течения в виде

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2} = k, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Треска.

Октаэдрические касательные напряжения являются универсальной функцией октаэдрического сдвига для любого сложного напряжённого состояния при пропорциональном изменении напряжений

$$\tau_{окт} = f(\gamma_{окт}),$$

где

$$\begin{aligned} \tau_{окт} &= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}, \\ \gamma_{окт} &= \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 6(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

В 1943 г. А.А. Ильюшин рассмотрел полные деформации и их приращения и обобщил теорию пластического течения Сен-Венана – Мизеса на упрочняющиеся среды. А.А. Ильюшин считал упругой объёмную

деформацию и не пренебрегал упругими деформациями. Закон упрочнения он записал в виде универсальной зависимости

$$\sigma = \Phi(S), S = \int_0^t \sqrt{\dot{\mathcal{E}}_{ij} \dot{\mathcal{E}}_{ij}} dt, \quad (5)$$

В 1954 г. А.А. Ильюшин выдвигает теорию процессов. Он описывает пятимерные векторные девиаторные пространства деформаций  $\mathcal{E}^{(5)}$  и напряжений  $\Sigma^{(5)}$ . Геометрически в виде траекторий нагружения и деформирования изображены в этих пространствах нагрузки и деформации.

А.А. Ильюшин описывает понятие образа процесса и постулат изотропии. Он делает вывод, что все существующие в то время теории пластичности удовлетворяют постулату изотропии. Для траекторий малой кривизны предлагаются соотношения

$$d\mathcal{E}_{ij} = \frac{dS}{\sigma} S_{ij} \text{ или } d\bar{\mathcal{E}} = \frac{dS}{\sigma} \bar{\sigma}, \quad (6)$$

где  $\bar{\mathcal{E}}, \bar{\sigma}$ , - вектора деформаций и напряжений в  $\mathcal{E}^{(5)}$  и  $\Sigma^{(5)}$ ,  $\sigma = \Phi(S)$  является универсальной функцией процесса.

Закон пропорциональной упругой разгрузки выглядит как закона Гука

$$\Delta \bar{\sigma} = 2G \Delta \bar{\mathcal{E}} \quad (7)$$

Для аппроксимации процессов при плоском нагружении для гладких траекторий малой кривизны, слабо отличающихся от простого нагружения используются аппроксимации

$$\sigma = \Phi(s) = \sigma^T + 2G_* \Delta S + \sigma_* (1 - e^{-\beta \Delta S}) \quad (8)$$

где:  $\Delta S = S - S^T$  - приращение дуги траектории деформирования на участках упрочнения.

Если на траектории имеется точка излома, то аппроксимация по предложению В.Г. Зубчанинова, используется в виде:

$$\sigma = \Phi(s) + Af_0^p \Omega(\Delta S)$$

$$\Delta S = S - S_0,$$

где

$$\Omega(\Delta S) = -[\gamma \Delta S e^{-\gamma \Delta S} + b(1 - e^{-\gamma \Delta S})] \quad (9)$$



$$\gamma \Delta S_M = 1 + b, \quad A\gamma(1 + b) = \frac{d\Phi_0}{dS} + 2b$$

Постоянные  $\gamma, b, A$  определяются согласно базовым экспериментам.

Вычисление компонент векторов напряжений и деформаций производились по следующим формулам:

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ \sigma_{11} - \frac{1}{2}(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \right]; S_2 = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sqrt{2}}; S_3 = \sqrt{2}\sigma_{12}$$

$$\mathcal{E}_1 = \sqrt{\frac{3}{2}}(\varepsilon_{11} - \varepsilon_0); \mathcal{E}_2 = \sqrt{2} \left( \varepsilon_{22} + \frac{1}{2}\varepsilon_{12} - \frac{3}{2}\varepsilon_0 \right); \mathcal{E}_3 = \sqrt{2}\varepsilon_{12}$$
(10)

где  $\sigma_{33} = 0$ ,  $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22})$ ,  $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{3K}$ ,  $K = 1,75 \cdot 10^5$  (Модуль объёмной деформации)

Косинус угла сближения для ломаных траекторий рассчитывался по формуле:

$$\cos\vartheta_1 = \frac{1}{\sigma \Delta S} [S_1(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_1^0) + S_2(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_2^0) + S_3(\mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_3^0)]$$
(11)

$$\text{где: } \Delta S = \sqrt{(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_1^0)^2 + (\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_2^0)^2 + (\mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_3^0)^2}$$

$K_0(\mathcal{E}_1^0, \mathcal{E}_3^0)$  - координаты точки  $K_0$  в начале прямолинейного участка траектории.

В **третьей главе** описывается автоматизированный испытательный комплекс СН-ЭВМ, средства измерения, образцы, материалы. В ходе изучения сложного нагружения материалов и их структуры использовались трубчатые образцы. Они подвергались экспериментальному исследованию напряженно-деформированного состояния при растяжении с кручением в пространстве деформаций и напряжений. Латунные трубчатые образцы Л63 с толщиной стенок  $h = 1$  мм, радиусом срединной поверхности  $R = 15,5$  мм, длиной рабочей части  $l = 110$  мм подвергались деформированию. При этом, материал образцов достаточно начально изотропен. Модуль упругости образцов был равен  $E = 0,95 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,37$ .

Система автоматического экспериментального комплекса состоит из нагружающей установки, датчиков усилий и деформаций, датчиков усилия

или сопротивления, системы графического отображения информации (монитор ЭВМ), управляющей ЭВМ с устройством связи и блока управления.

Для испытаний на комплексе СН-ЭВМ используются образцы трубчатой формы. В его стенках возникает однородное плоское напряженное состояние благодаря большому отношению радиуса образца к его толщине. Для получения более точного результата, требуются строгие пределы полей допусков и геометрических отклонений.

Проводился химический анализ образцов. Образцы от проката диаметром 50 мм, условно замаркированные «К» и «С».

1. Материал образцов содержит химические элементы, %:

	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>P</b>	<b>Zn</b>	
«К»	64,0	0,07	0,016	не опр.	не опр.	0,01	35,5	
«С»	64,8	0,04	0,005	не опр.	не опр.	0,01	34,8	

Таблица 3.1

что соответствует латуни марки Л63 ГОСТ 2060-2006.

2. Твердость образцов: «К» - 70,2 5/250НВ; «С» - 79,5 5/250НВ

3. Микроструктура образцов:

«К» -  $\alpha$ -фаза +  $\beta$ -фаза, расположенная по границам зерен  $\alpha$ -фазы. Рисунок 1 – микроструктура образца «К» после травления реактивом:

5 г FeCl<sub>3</sub> + 15 см<sup>3</sup> HCl + 50 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O

«С» - двойниковые равноосные зерна  $\alpha$ -твердого раствора. Рисунок 2 – микроструктура образца «С» после травления реактивом:

5 г FeCl<sub>3</sub> + 15 см<sup>3</sup> HCl + 50 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O

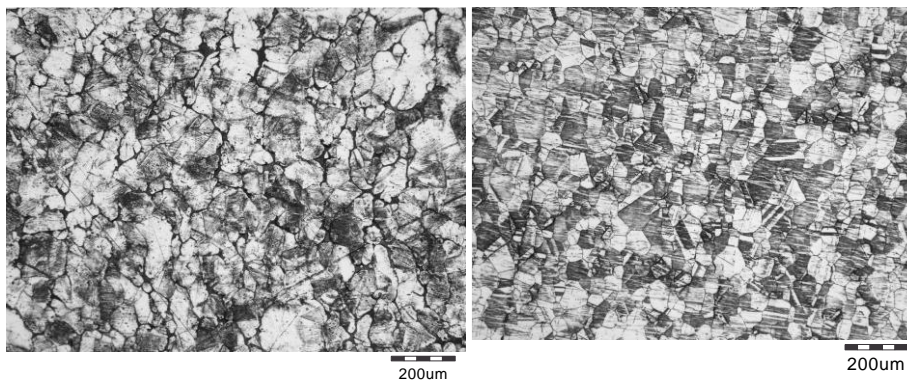


Рис. 1

Рис. 2

В четвертой главе отражены экспериментальные исследования по деформированию латуни Л63 при сложном нагружении по ломанным и гладким траекториям постоянной кривизны.

Базовыми называем такие исследования, которые нацелены на выявление действия каждого параметра простого и сложного нагружений на ход деформирования. Такими параметрами можно назвать длину дуги траектории деформирования  $s$  (параметр прослеживания процессов), параметры кривизны и кручения  $\alpha_m$  ( $m=1,2,3,4$ ), углы излома траекторий  $\Theta_k$ , температуру  $T$ .

Модули векторов напряжений и деформаций, равные модулям девиаторов напряжений и деформаций определялись по формулам:

$$\sigma = \sqrt{S_1^2 + S_3^2}, \quad \varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2} \quad (12)$$

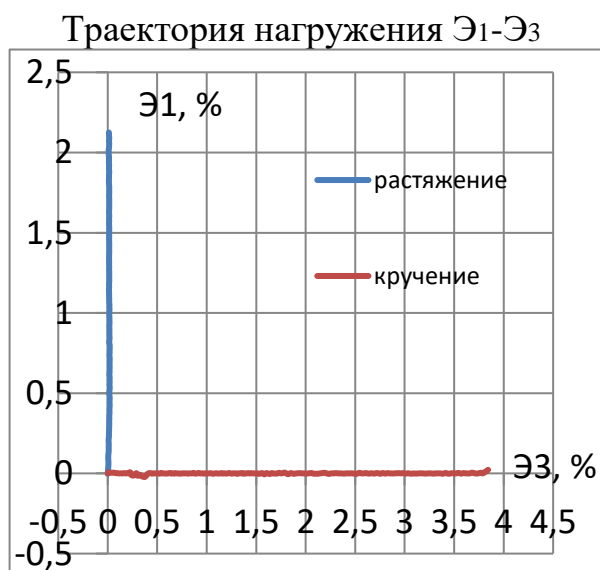


Рис. 3

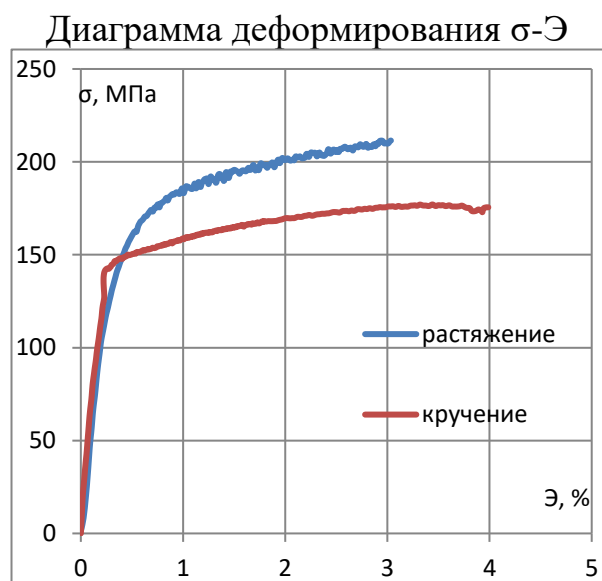


Рис. 4

На рисунке 3 изображены программы базовых траекторий деформирования, на рисунке 4 – диаграмма деформирования.

Далее выполнялся блок экспериментов по двузвенным ломаным траекториям и различными точками излома. Эксперименты осуществлялись в векторном пространстве деформаций в плоскости  $\mathcal{E}_1\mathcal{E}_3$ , а соответствующий им отклик по напряжениям определялся в плоскости  $S_1S_3$  векторного пространства девиатора напряжений. Программа серии экспериментов с точками излома при  $\mathcal{E}_1^0 = 2\%$  приведена на рисунке 5.

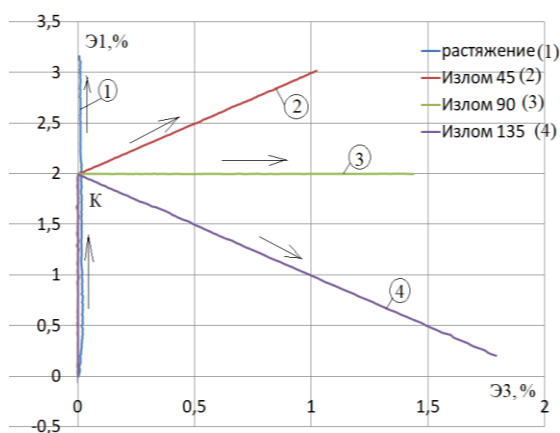


Рис. 5

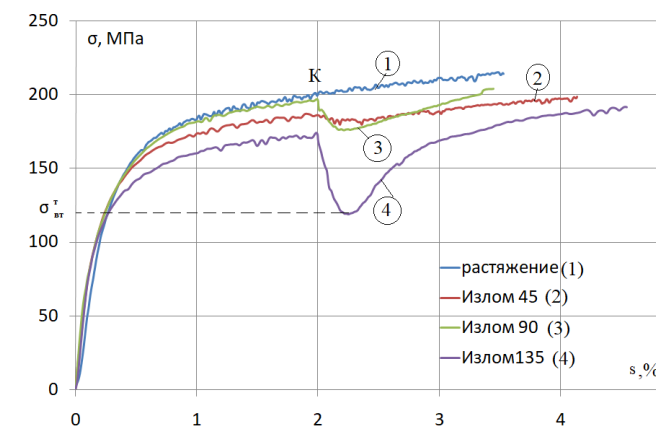


Рис. 6

Были проведены экспериментальные исследования по двузвенным ломаным траекториям деформирования с углами излома  $45^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $135^\circ$ . После излома траектории при угле  $45^\circ$  на втором звене испытуемый образец был подвергнут одновременному кручению и растяжению, при угле  $90^\circ$  - кручению при  $\mathcal{E}_1 = \text{const}$ , при угле  $135^\circ$  – одновременному кручению и сжатию,.

На рисунках 6 и 7 приведены диаграммы  $\sigma-s$  и  $\sigma-\mathcal{E}$ , где  $s$  – длина дуги траектории. Из рисунка видно, что при изломе траектории на диаграммах наблюдаются «нырки» напряжений, которые при угле излома  $45^\circ$  составили 8 МПа, при угле излома  $90^\circ$  – 18,5 МПа, при угле излома  $135^\circ$  – 52,7 МПа. Опускающаяся часть «нырка» соответствовала неполной упругой сложной разгрузке материала до минимума напряжения  $\sigma_{BT}^T$ , при котором происходит «протыкание» предельной поверхности текучести и создаются вторичные пластические деформации. Напряжение  $\sigma_{BT}^T$  названо вторичным пределом текучести. При угле излома  $45^\circ$  получено  $\sigma_{BT}^T = 181,8 \text{ МПа}$ , угле  $90^\circ$  –  $\sigma_{BT}^T = 176,4 \text{ МПа}$ , угле  $135^\circ$  –  $\sigma_{BT}^T = 120,3 \text{ МПа}$ . На рисунках 8 и 9 представлены

локальные диаграммы деформирования  $S_1$ - $\mathcal{E}_1$  и  $S_3$ - $\mathcal{E}_3$ . На ниспадающей части «нырка» происходит упругая разгрузка на диаграмме  $S_1$ - $\mathcal{E}_1$  и упругое нагружение на диаграмме  $S_3$ - $\mathcal{E}_3$  при кручении образца. На восходящей ветви «нырка» продолжается упругая разгрузка по растяжению-сжатию, однако происходит активное пластическое деформирование по кручению, что и является причиной прекращения частичной упругой разгрузки материала (рис. 8, 9).

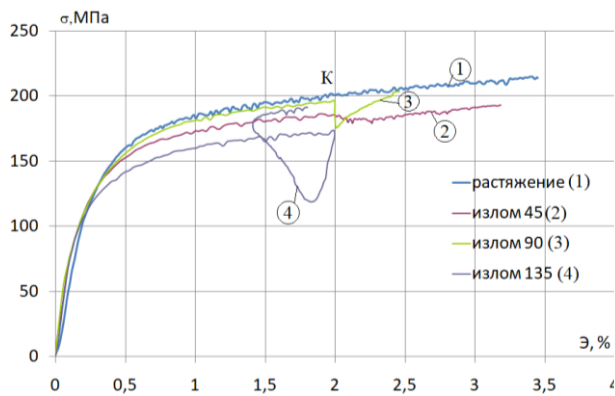


Рис. 7

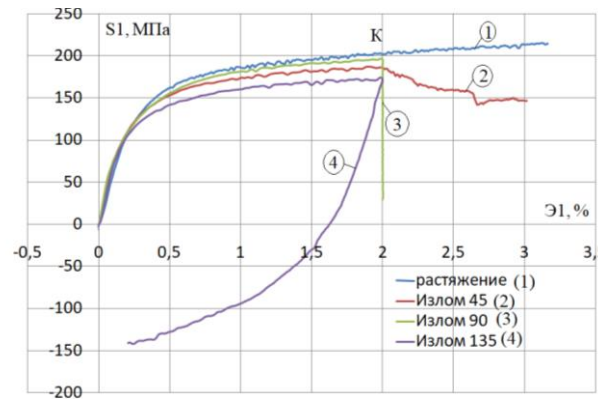


Рис. 8

Векторные свойства материала для углов излома  $45^\circ$ ;  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  можно увидеть на рисунке 10, где представлены зависимости угла сближения  $\vartheta_1$  от приращения длины дуги траектории  $\Delta S$  после точки излома.

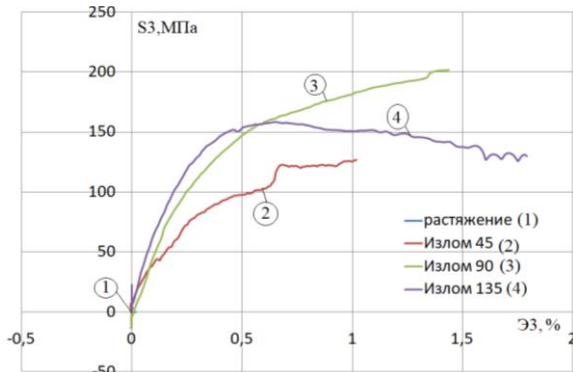


Рис. 9

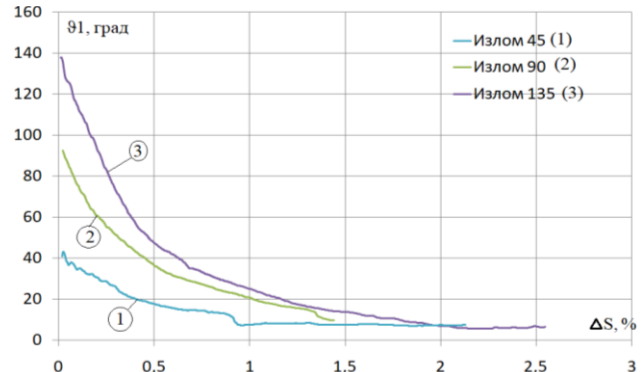


Рис. 10

Аналогично выполнялась программа серии экспериментов с точками излома при  $\mathcal{E}_1^0 = 3\%$

Далее реализовывались гладкие траектории различных кривизн. Первой представлена криволинейная траектория, в процессе деформирования которой задана различная кривизна, при этом центр окружности смещается по оси  $\mathcal{E}_1$  в положительную сторону. Эксперименты, результаты которого показаны в векторном представлении деформаций и напряжений А.А. Ильюшина, выполнялись в пространстве деформаций  $\mathcal{E}_1$ - $\mathcal{E}_3$  при одновременном воздействии крутящего момента и осевой силы. Напряжение

осуществлялось при постоянной температуре, деформации подразумеваются малыми.

Программу деформирования, показанную на рисунке 11, можно описать следующим образом: начинающиеся из начала координат пять окружностей различного радиуса  $R_1 = 0.25\%$ ,  $R_2 = 0.5\%$ ,  $R_3 = 0.75\%$ ,  $R_4 = 1\%$ ,  $R_5 = 1.5\%$  и различной кривизны  $\pm 400$ ,  $\pm 200$ ,  $\pm 133$ ,  $\pm 100$ ,  $\pm 67$ .

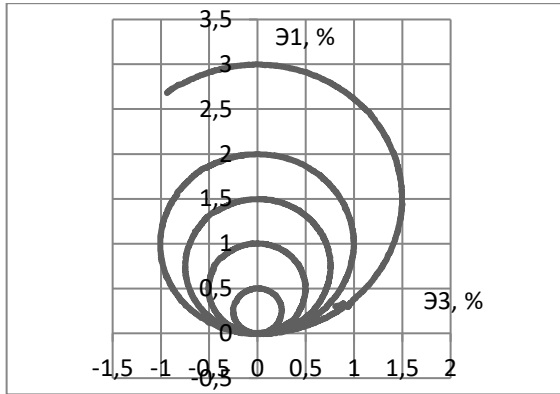


Рис. 11 Траектория деформирования

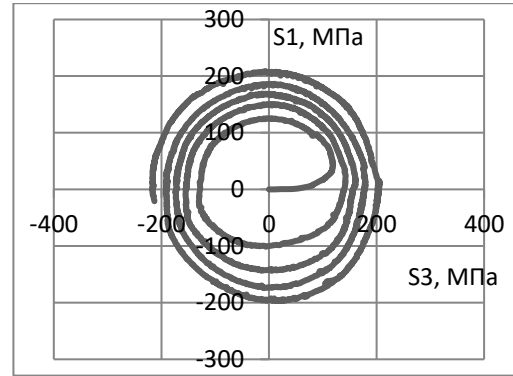


Рис. 12 Отклик по напряжениям  $S_1 - S_3$ .

На рисунке 12 отражен отклик  $S_1 - S_3$ , построенный в пространстве напряжений. Глобальную диаграмму деформирования  $\sigma - \varepsilon$  представлена на рисунке 13, а диаграмму прослеживания процесса деформирования  $\sigma - s$  на рисунке 14. Диаграмма  $\sigma - s$  характеризует векторные свойства материала, где  $s$  является длиной дуги траектории деформирования.

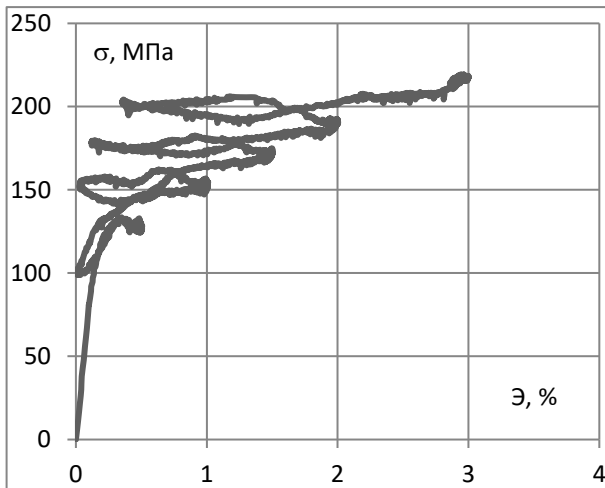


Рис. 13. Диаграмма деформирования  $\sigma - \varepsilon$ .

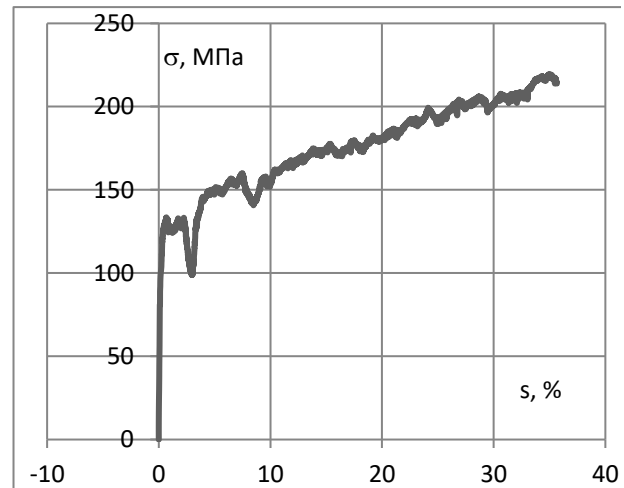


Рис. 14. Диаграмма деформирования  $\sigma - s$ .

На рисунках 15, 16 отражены две локальные диаграммы деформирования ( продольного нагружения  $S_1 - \varepsilon_1$  и кручение  $S_3 - \varepsilon_3$ ). Диаграмма зависимости  $\vartheta_1 - s$ , характеризующая векторные свойства материала, показана на рисунке 17.

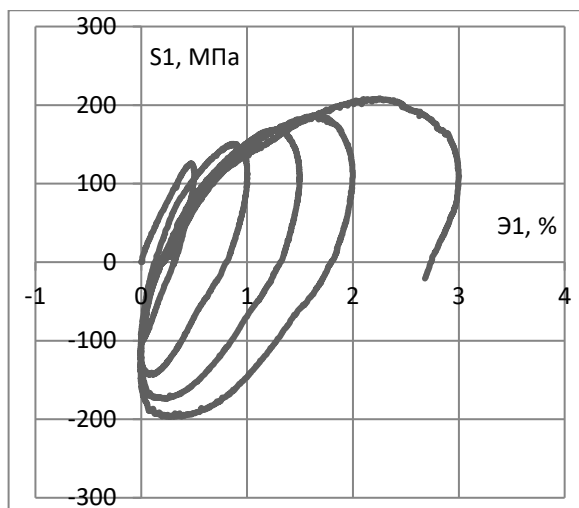


Рис. 15 Локальная диаграмма деформирования  $S_1 - \varepsilon_1$ .

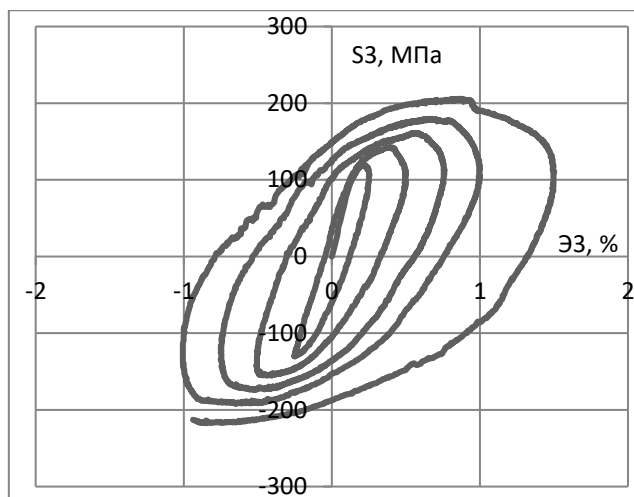


Рис. 16 Локальная диаграмма деформирования  $S_3 - \varepsilon_3$ .

Установлено, что при проведении экспериментальных исследований по гладким траекториям с неизменной кривизной, проявляется постоянный режим деформирования с одинаковым значением угла сближения  $\vartheta_1$ . В нашем же случае видно, что при смене значения кривизны на диаграмме зависимости угла сближения от длины дуги траектории проявляется колебательный эффект.

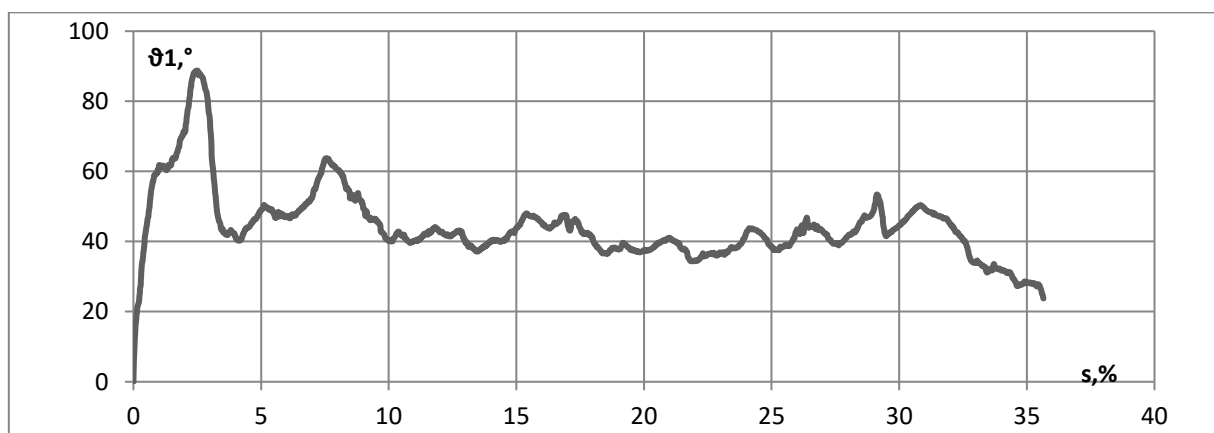


Рис. 17 Диаграмма  $\vartheta_1 - s$ .

Далее представлена программа деформирования, показанная на рисунке 18. Ее возможно описать следующим образом: начинающиеся из начала координат четыре полуокружности одинакового радиуса  $R_1 = 0.25\%$ , с кривизной  $\pm 400$ . При достижении первой полуокружностью  $\varepsilon_1 = 0.5\%$ , кривизна меняется по знаку и продолжается построение второй полуокружности. Аналогичным образом происходит переход на третью и четвертую полуокружность. При завершении формирования четвертой полуокружности смена знака кривизны не происходит, знак кривизны

меняется при завершении построения до целой окружности. Далее происходит сжатие образца со знакопеременным кручением.

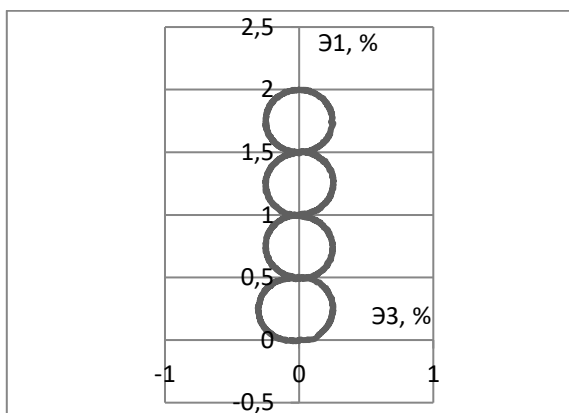


Рис.18

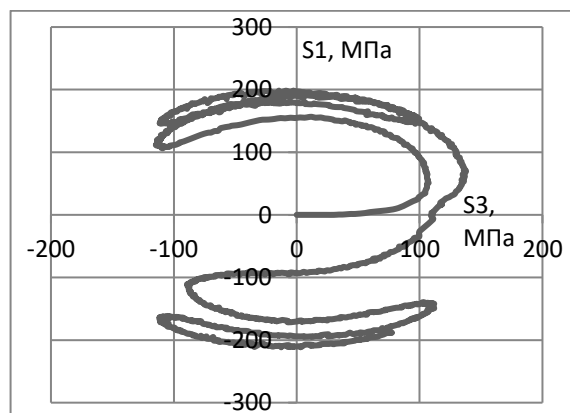


Рис.19

При переходе с одного участка на другой, т.е. при изменении знака кривизны окружности, наблюдался «нырок» на диаграмме деформирования (рис. 20). Похожий эффект наблюдается на двузвенных ломаных траекториях при наличии угла излома. В свою очередь отклик (рис.19) показывает, что присутствует процесс деформирования без упругой разгрузки. На рисунке 21 представлена диаграмма прослеживания процесса, а на рисунке 20 – диаграмма деформирования. Локальные диаграммы деформирования представлены на рисунках 22-23.

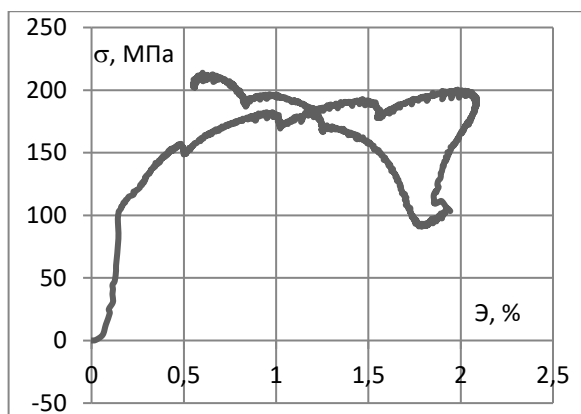


Рис.20

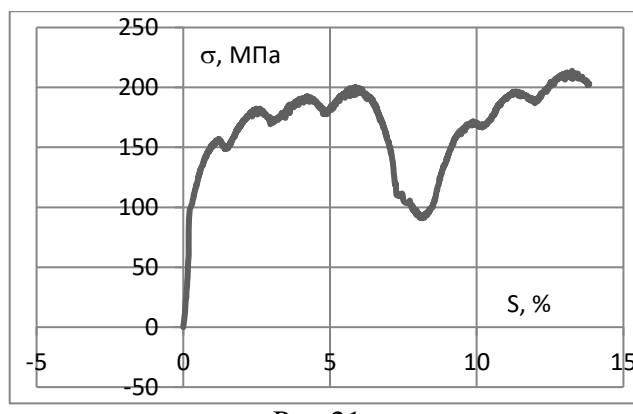


Рис.21



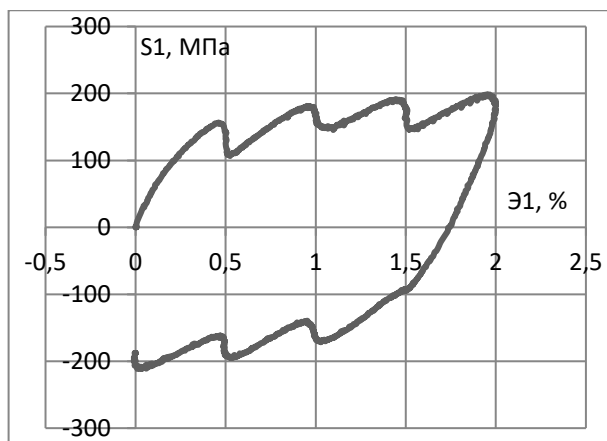


Рис.22

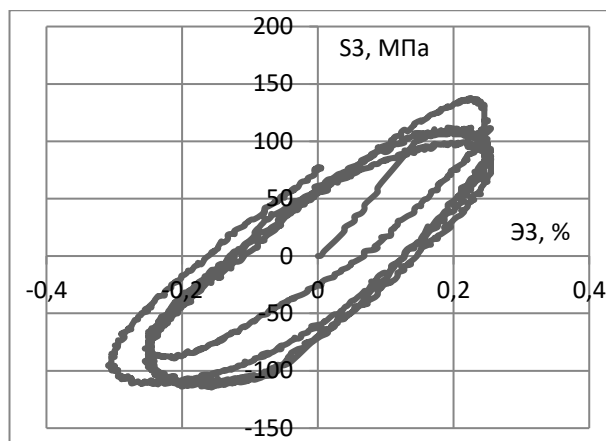


Рис.23

Векторные свойства материала представлены на рисунке 24. Замечено, что при смене значения кривизны на диаграмме зависимости угла сближения от длины дуги траектории проявляется ярко выраженный колебательный эффект.

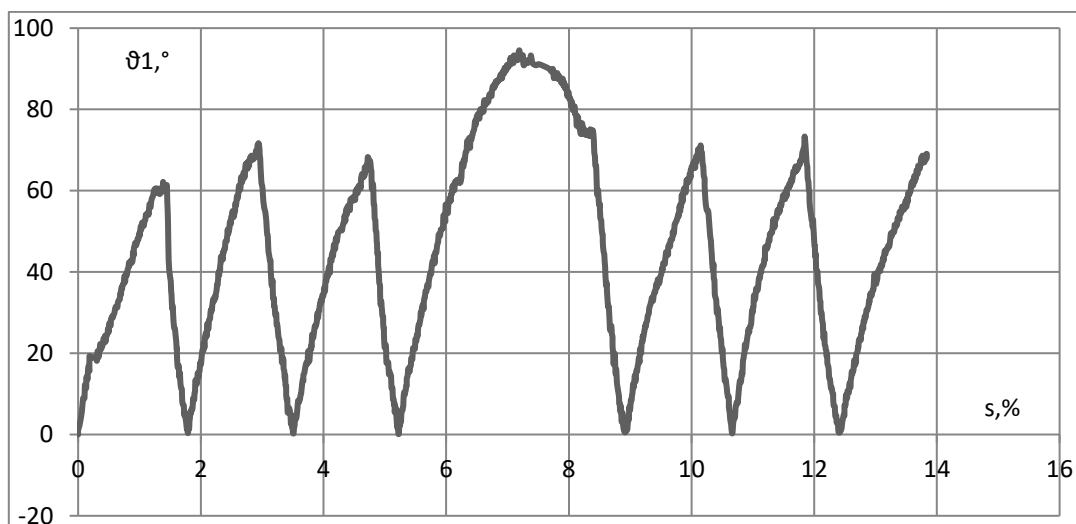


Рис. 24

В ходе следующего испытания на первом участке было реализован процесс простого деформирования кручением до  $\varepsilon_3 = 1\%$ . Далее из этой точки начинался процесс сложного деформирования по криволинейной траектории постоянной кривизны с радиусом  $R = 0.5\%$ . При этом точка излома отсутствовала, выполнялся излом траектории на  $45^\circ$  и повторялось построение окружности с аналогичным радиусом. Построение следующих участков выполнялось аналогичным образом, с аналогичными углами излома траектории, радиусами и кривизнами. Таким образом было реализовано пять завершенных окружностей. (рис.25).

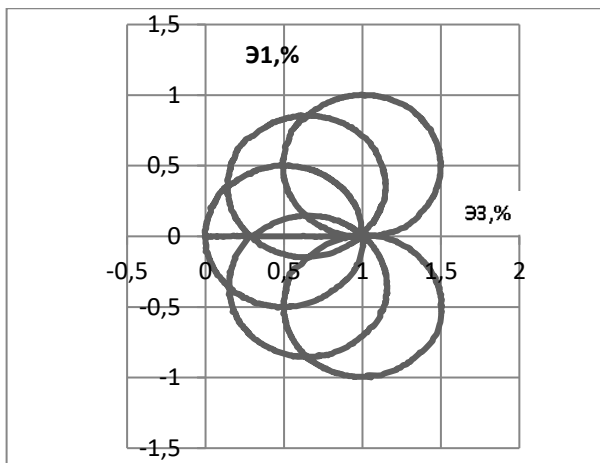


Рис.25

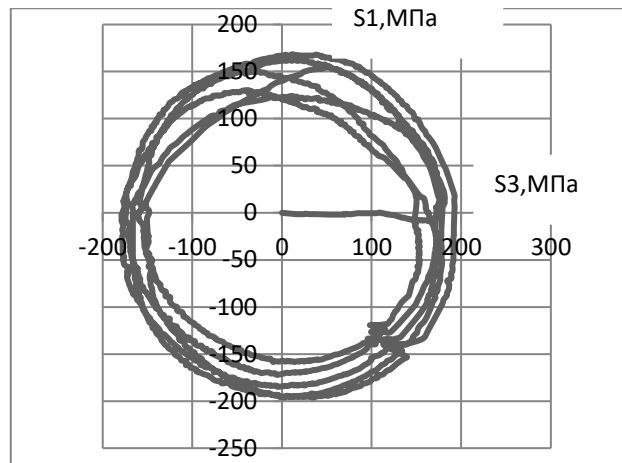


Рис.26

Отклик в пространстве напряжений представлен на рисунке 26. На рисунке 28 представлена диаграмма прослеживания процесса, а на рисунке 27 – диаграмма деформирования. Локальные диаграммы деформирования представлены на рисунках 29 и 30.

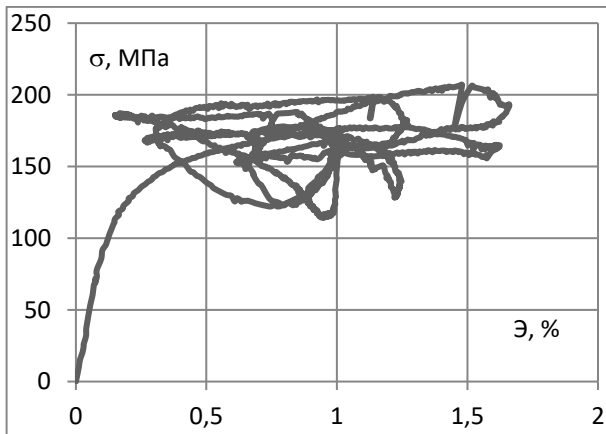


Рис. 27

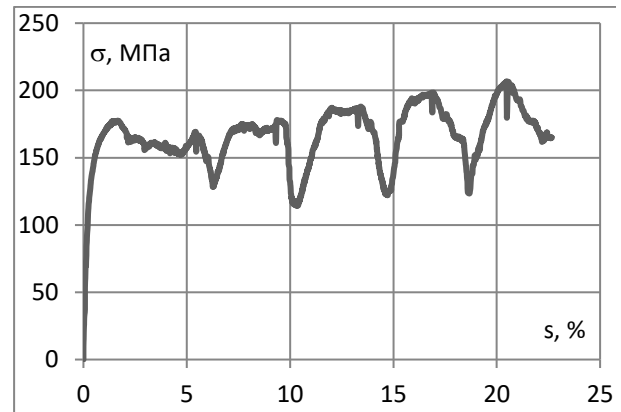


Рис. 28

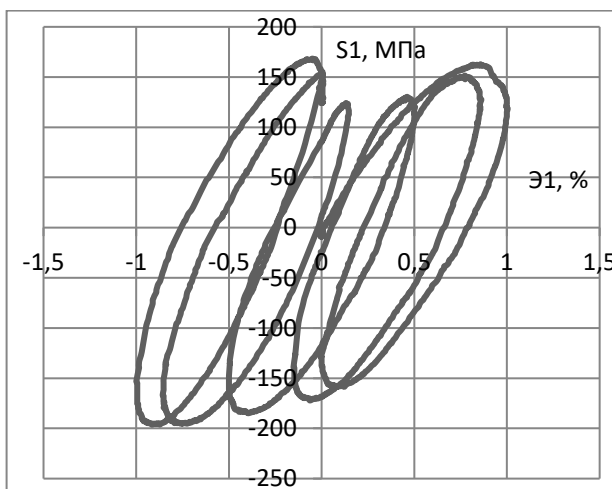


Рис. 29

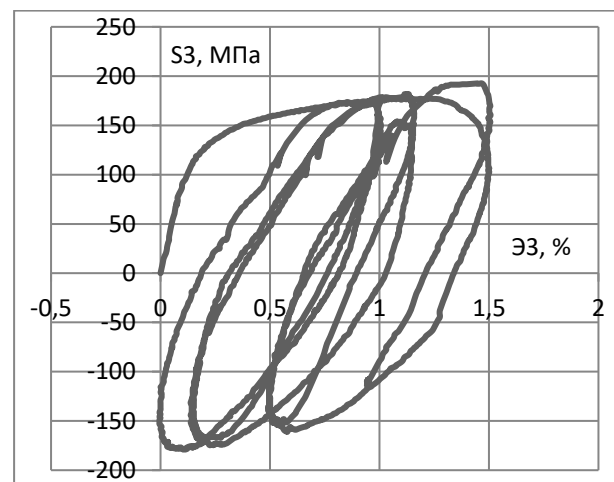


Рис. 30

Анализ векторных свойств (рис. 31) показал, что на первой окружности, при заданной кривизне, угол сближения  $\vartheta_1$  возрастает до  $58^\circ$ , а далее начинает корректироваться, доходя до отметки в  $45^\circ$ . Затем, при изломе траектории деформирования на  $45^\circ$ , угол сближения скачкообразно увеличивается на аналогичную величину. Такое же поведение угла сближения характерно и при дальнейших изломах программы деформирования.

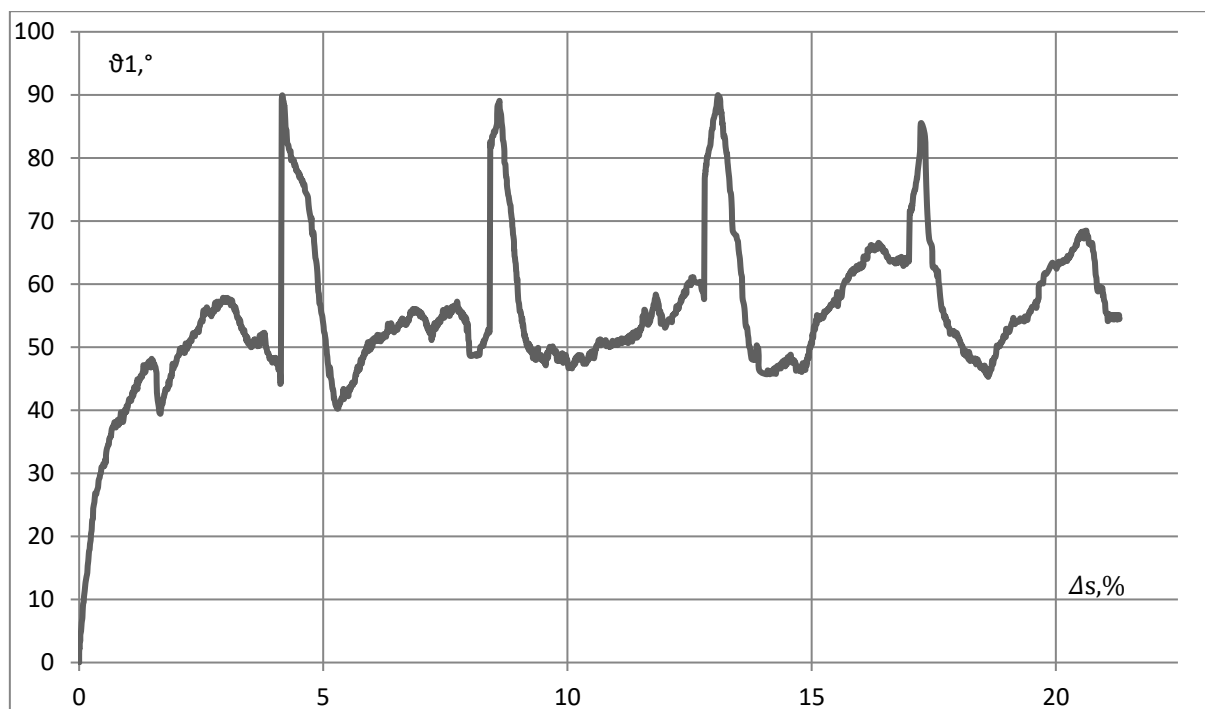


Рис. 31

### Основные результаты и выводы

1. Проведены экспериментальные исследования латунных тонкостенных трубчатых образцов марки Л63 на экспериментально-расчетном комплексе СЧ-ЭВМ на базе лаборатории кафедры «Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета по базовым, двузвенным ломаным и криволинейным траекториям. Определен химический состав и микроструктура исследуемого материала из которого изготавливались образцы для испытаний.
2. Изучены механические свойства материала латуни Л63 на сложных процессах деформирования по программе смещенного веера ломаных плоских траекторий. Отмечено, что в экспериментальных исследованиях по типу двузвенных ломаных траекторий образуются прямые и обратные «нырки» на диаграммах прослеживания процессов и диаграммах

деформирования. На нисходящей части «нырка» имеет место быть частичная упругая разгрузка, на восходящей части нырка реализовывался активный процесс упругопластического деформирования.

3. В экспериментальных исследованиях гладких плоских криволинейных траекторий установлено, что при изломах прямолинейной траектории на угол  $90^\circ$  и последующем переходе к криволинейному деформированию с постоянной кривизной имеет место «нырок», аналогичный тем, которые присутствуют на двузвенных ломаных траекториях.

4. Предложены аппроксимации реальных программ прослеживания процессов при различных процессах деформирования и частичной сложной разгрузки.

5. В экспериментах по траекториям типа двузвенных ломаных угол сближения, характеризующий векторные свойства материала, при изломе траектории деформирования скачкообразно изменяется примерно на величину угла излома, постепенно начинает уменьшаться и стабилизируется на  $6-7^\circ$ .

6. В экспериментах по криволинейным траекториям постоянной и переменной кривизны обнаружены закономерности в зависимостях между механическими и векторными свойствами:

а) при изломах прямолинейной траектории на угол  $90^\circ$  и последующем переходе к криволинейному деформированию с постоянной кривизной угол сближения скачкообразно увеличивается на величину угла излома траектории с дальнейшей стабилизацией на уровне  $30^\circ-40^\circ$ , а угол сближения зависит от кривизны траектории деформирования.

б) при наличии угла излома, который образуется при переходе с криволинейной траектории на другую криволинейную траекторию, угол сближения также скачкообразно увеличивался на величину угла излома.

в) на криволинейных траекториях постоянной кривизны, где меняется ее знак замечено, что векторные свойства имеют волнообразный характер. При смене знака кривизны угол сближения падает до нуля и только потом начинает снова расти.

**В приложении** представлены: акт о внедрении в учебный процесс, технический акт внедрения, данные экспериментальных исследований.

## Основные публикации по теме диссертации

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК России

1. Двужилов А.С. Исследование латуни Л63 по гладкой криволинейной траектории типа «веер смещенных окружностей» / В.Г. Зубчанинов, В.И. Гультияев, А.С. Двужилов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2023. – № 1(55). – С. 26-32. 122
2. Двужилов А.С. Экспериментальные исследования сложного нагружения латуни Л63 на двузвенных ломаных траекториях типа «смещенный веер»./ В.Г. Зубчанинов, В.И. Гультияев, А.А. Алексеев, А.С. Двужилов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2023. – № 1(55). – С. 18-25.

### Публикации в других изданиях

3. Двужилов А.С. Экспериментальное исследование латуни Л63 при сложном нагружении по двузвенным ломаным / В.Г. Зубчанинов, В.И. Гультияев, А.А. Алексеев, А.С. Двужилов// Авиационные двигатели. – 2023. – № 1(18). – С. 99-103.
4. Двужилов А. С. Математическое моделирование процессов пластического деформирования материалов / А. С. Двужилов, В. Г. Зубчанинов // Математическое моделирование в естественных науках. – 2014. – Т. 1. – С. 88-91.
5. Двужилов. А. С. О механических свойствах стали 30ХГСА при простом и сложном нагружениях / В. Г. Зубчанинов, А. С. Двужилов, А. В. Федяев [и др.] // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2014. – № 2(26). – С. 78-82.
6. Двужилов, А. С. Математическое моделирование процессов деформирования латуни для двузвенных траекторий / А. С. Двужилов, В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультияев // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела : Материалы VIII Международного научного симпозиума, посвященного 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова, Тверь, 09–11 декабря 2015 года / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный технический университет». – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. – С. 142-144.
7. Двужилов, А. С. Методика обработки экспериментальных данных при растяжении металла за пределом упругости / А. С. Двужилов, Ю. Н.

Клементьева // Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых учёных Тверского государственного технического университета : Сборник научных трудов. – Тверь : Тверской государственный технический университет, 2017. – С. 396-402.

8. Двужилов А. С. Моделирование процессов упругопластического деформирования прямолинейных ломаных траекторий / В. Г. Зубчанинов, А. С. Двужилов, В. И. Гульяев // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела : межвузовский сборник научных трудов / Тверской государственный технический университет. Том Выпуск 2. – Тверь : Тверской государственный технический университет, 2018. – С. 54-57.