

В. И. Гультияев, А. Н. Булгаков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ СН-ЭВМ

Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия

Аннотация. В статье дано описание испытательного комплекса и методики проведения экспериментов для изучения сложного нагружения. Приведены некоторые вопросы исследования упругопластического деформирования материалов на автоматизированной комплексе СН-ЭВМ в лаборатории механических испытаний кафедры Сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета

Ключевые слова: упругопластические процессы, пластичность, испытательный комплекс СН-ЭВМ, упругость.

DOI: 10.37972/chgpu.2023.56.2.006

УДК: 539.374

1. Введение В процессе эксплуатации некоторые элементы конструкций подвергаются сложному нагружению, при этом напряжения локально могут превышать предел текучести. Рост сложности форм современных конструкций и увеличение интенсивности нагрузок также приводят к неоднородности напряженно-деформированного состояния и появлению областей пластичности. Следовательно, практически важной задачей экспериментальной механики деформируемых твердых тел является исследование механических свойств конструкционных материалов и разработка математических моделей достоверно описывавших закономерности сложного неупругого поведения.

© Гультияев В. И., Булгаков А. Н., 2023

Гультияев Вадим Иванович

e-mail: vig0@mail.ru, доктор технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия,

Булгаков Александр Николаевич

e-mail: elstatik@bk.ru, ассистент кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия.

Поступила 20.08.2023

2. Постановка задачи Современная механика материалов не может успешно развиваться без экспериментальной базы. Первые машины на сложное нагружение были созданы в середине XX века в Московском Государственном Университете, институте механики РАН, институте механики НАН, ЦНИИМАШ и ряде других научно-исследовательских центров. Разработка автоматизированного экспериментального комплекса [1], который позволил бы обосновать физическую достоверность теории процессов А. А. Ильюшина и проверить практически все частные теории пластичности для различных классов траекторий нагружения и деформирования, на кафедре Сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского Государственного технического университета началась в конце 70-х годов XX века. Руководил проектом Зубчанинов Владимир Георгиевич, а Алексей Антонович Ильюшин лично участвовал в испытаниях, детально анализировал работу комплекса и полученные результаты. Автоматизированный экспериментальный комплекс состоит из механической части, гидроприводов осевого усилия и внутреннего давления, автономного блока управления и компьютера. На рисунке 1 представлен общий вид механической части СН-ЭВМ, выполненной на базе универсальной испытательной машины ЦДМУ-30. В конструкцию был внесен ряд изменений, которые позволили полностью автоматизировать процесс испытаний [2]. Более подробно электромеханическая часть описана в [3].

Автоматизированный комплекс СН-ЭВМ функционирует следующим образом: оператор загружает программу с внешнего носителя или вносит изменения в существующую программу с клавиатуры, после чего эта информация сохраняется в оперативной памяти компьютера (рис.2). Программа эксперимента содержит информацию о режиме управления, количестве участков траектории нагружения или деформирования и их типе. Для написания программ используется интегрированная среда разработки и компилятор Microsoft QuickBASIC (QB) для объектно-ориентированного языка Basic.

Следующим этапом является настройка параметров эксперимента на блоке управления (рис.2, 1). 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. После проверки работоспособности всех систем дается команда о начале эксперимента.

В процессе эксперимента на блок измерительных преобразователей сигналов поступают различные по физической природе сигналы датчиков (таблица 1), которые преобразуются в унифицированные электрические уровни напряжения и передаются в компьютер.

Примечание: погрешность измерения, в основном, возникает вследствие линейной аппроксимации собственных характеристик тензометра.

Вся информация о реализуемом процессе в режиме реального времени отображается на мониторе компьютера (рис. 2, 3). Полученная информация автоматически записывается в постоянную память компьютера в виде файла данных с заданными оператором временными интервалами.

3. Методы решения Методика проведения экспериментальных исследований и обработка их результатов базируется на векторном представлении напряжений и деформаций по А.А. Ильюшину [4].

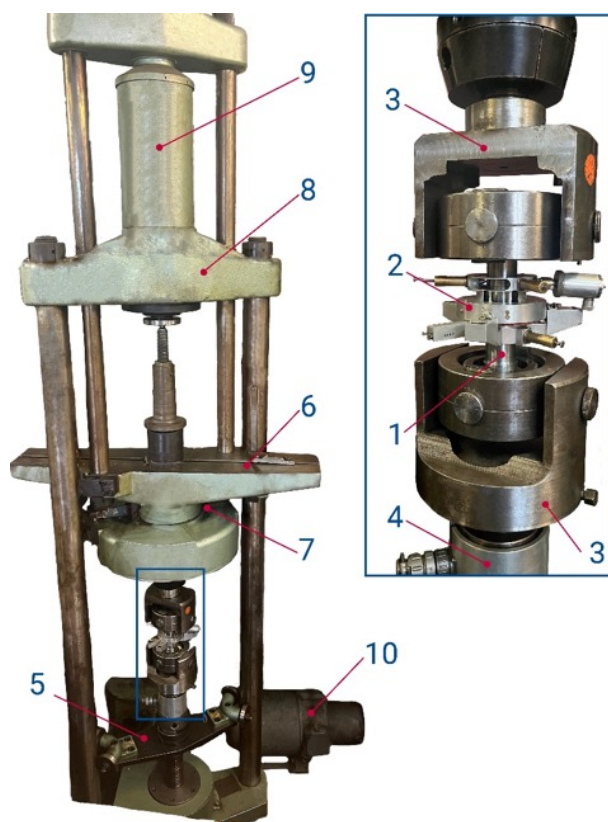


Рис. 1. Общий вид механической части испытательной машины СН-ЭВМ. 1 – образец для испытания; 2 – дифференциальный тензометр; 3 – захватные приспособления; 4 – двухкомпонентный силоизмеритель; 5 – нижняя траверса; 6 – верхняя траверса; 7 – двигатель привода кручения; 8 – неподвижная траверса гидроцилиндра; 9 – гидроцилиндр; 10 – двигатель механического привода осевого усилия.

Эксперименты проводят на тонкостенных трубчатых образцах из металлов и сплавов [5], с толщиной стенки 1 мм, диаметром срединной поверхности 31 мм и длиной рабочей части 110 мм (рис. 3). Отношение радиуса образца к толщине стенки 15. Испытательные образцы для серии экспериментов изготавливаются из одного прутка длиной 6м. Форма и размеры испытательных образцов показаны на рис.3

Для измерения осевых, окружных и сдвиговых перемещений оболочки применяется экстензометр (рис.4, 1) [6]. Для измерения поперечных деформаций применяется специальный датчик (рис.4., 2). Основная часть прибора состоит из двух колец в каждом из которых находится по три стальных втулки расположенный под углом 120°. Внутри втулок устанавливаются иглы, которые перемещаются без зазоров и люфтов. На наружной поверхности втулок сделана нарезка, на которую навинчивается колпачок. В полости каждой иглы размещается пружинка, которая, прижимает иглу к образцу (рис.4, 3) при закручивается колпачка. За счет этого достигается надежное крепление колец на образце и незначительное надавливание игл при увеличении диаметра образца. База прибора составляет 50+0,1 мм.

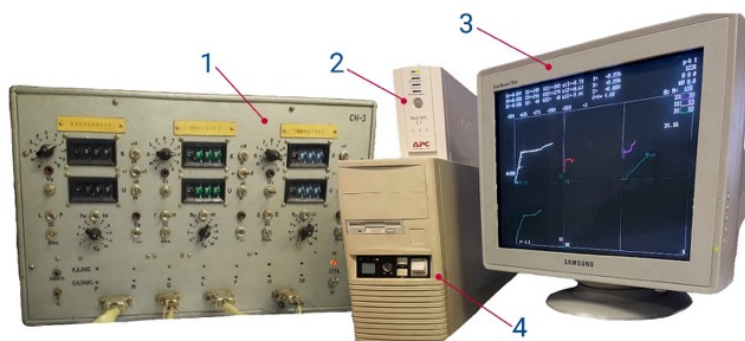


Рис. 2. Автономный блок управления и компьютер. 1 – блок управления; 2 – источник бесперебойного питания; 3 – монитор; 4 – системный блок

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
Датчик давления	Внутреннее давление	30 МПа	$\pm 0,2$ МПа
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

Таблица 1. Параметры автоматизированного комплекса СН-ЭВМ

Для предотвращения смещения и во избежание возможного перекоса колец при монтаже прибора на образец используется специальное приспособление (рис.4, 4). Оно представляет собой ступку, в которую вертикально устанавливается образец. Между образцом и стенками ступки устанавливаются специальные фиксирующие детали – сухари (рис.4, 5), внутренний диаметр которых выдержан по наружному диаметру образца. Верхние и нижние сухари имеют выступы, на которые, в период монтажа, опираются кольца с иглами. Высота колец подобрана таким образом, что, при отсутствии зазора между ними, оси игл лежат в параллельных плоскостях, отстоящих

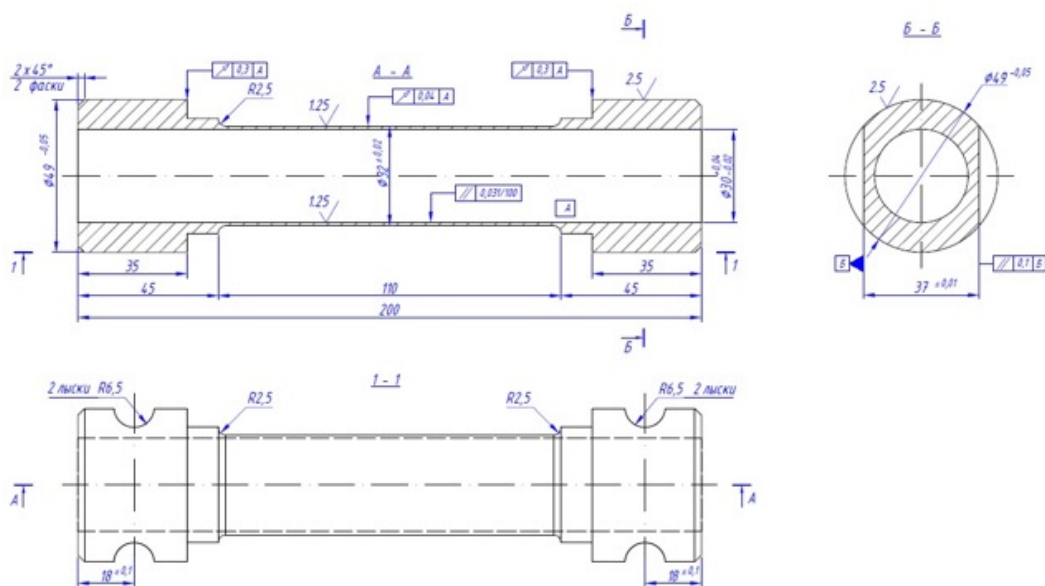


Рис. 3. Образец для испытания

друг от друга на расстоянии 50 мм. После того как иглы должным образом поджаты к образцу, сначала снимаются верхние сухари, а за ними нижние. Образец с прибором фиксируется на испытательной машине захватными приспособлениями (рис.1, 3). Удлинение образца измеряется тензорезисторами по взаимному смещению колец. Угловые деформации измеряются тензорезисторами наклеенными на упругий элемент, один конец которого жестко закреплен, другой может скользить по спицали Архимеда.

Как показывают многочисленные опыты, описанный прибор надежно определяет деформации как упругой, так и пластической областях – малых и средних деформаций. Благодаря наличию двух индикаторов, небольшое внецентренное растяжение или сжатие не искажало правильность замера продольной деформации. Прибор, определявший изменение наружного диаметра по мере нагружения образца, показан на рисунке (рис.4, 2).

Перед каждым экспериментом производятся обмерные работы. Контроль геометрических параметров образцов производится при помощи микрометров и специальных приспособления для измерения толщины стенки, шероховатость поверхности устанавливают визуально.

4. Основные результаты Перед выполнением основных программ, исследования закономерностей упругопластического деформирования материалов при сложном нагружении, проводится проверка начальной изотропии материала образцов. Она заключается в проведении базовых экспериментов и сопоставлении диаграмм деформирования при простых процессах нагружения: растяжении, сжатии, кручении, внутреннем (внешнем) давлении и пропорциональных процессах нагружения. Если для

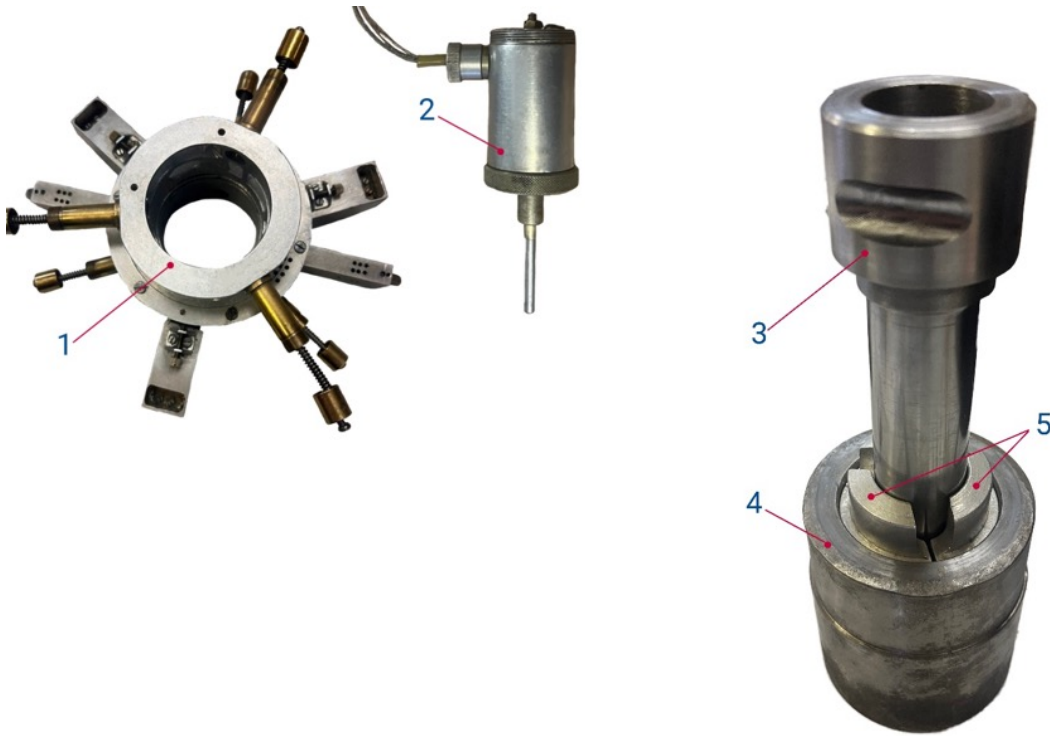


Рис. 4. Дифференциальный тензомер (1) и датчик поперечных деформаций (2)

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, что 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. Программа испытаний реализовывалась в векторном подпространстве деформаций $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (рис. 5, а). Для каждого нагружения использовался свой образец. Соответствующий ей отклик приведен в векторном подпространстве девиатора напряжений $S_1 - S_3$ (рис. 5, б).

На рисунке 6 показаны образцы после испытаний.

Для расчета компонент тензора напряжений σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) и тензора деформаций ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) использовались следующие формулы:

$$\sigma_{11} = \frac{P}{2\pi R h}; \sigma_{22} = p \frac{R}{h}; \sigma_{12} = \frac{M_{кр}}{2\pi R^2 h}; \sigma_{33} \approx 0; \sigma_{13} = \sigma_{23} \approx 0$$

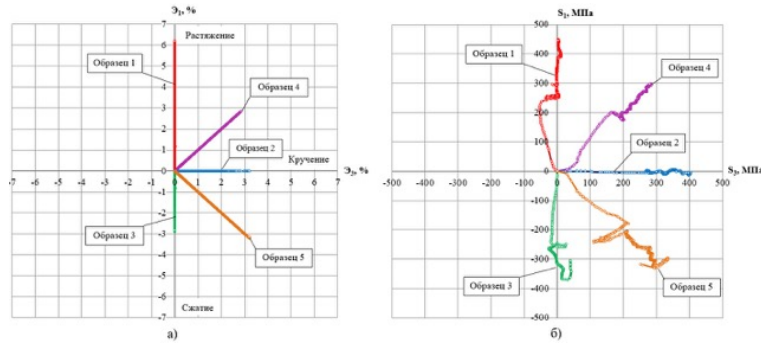


Рис. 5. Программа, а) и отклик на программу б). (1 – растяжение, 2 – кручение, 3 – сжатие, 4 – пропорциональное растяжение с кручением, образец 5 – пропорциональное сжатие с кручением).



Рис. 6. Образцы после испытаний (1 – растяжение, 2 – кручение, 3 – сжатие, 4 – пропорциональное растяжение с кручением, образец 5 – пропорциональному сжатию с кручением).

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22}); \varepsilon_{11} = \frac{\Delta l}{l}; \varepsilon_{22} = \frac{\Delta R}{R}$$

$$\varepsilon_{12} = \varphi \frac{R}{2l}; \varepsilon_{33} = -(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + \frac{\sigma_0}{3K}; \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{3K}$$

где P – осевая нагрузка, p – внутреннее давление, $M_{кр}$ – крутящий момент, $K = E/[3(1 - 2\mu)]$ – объемный модуль упругости Эйлера–Юнга, μ – коэффициент Пуассона, Δl – абсолютное удлинение рабочей части образца, φ – угол взаимного поворота сечений, ΔR – изменение радиуса срединной поверхности образца, σ_0 – среднее напряжение, ε_0 – средняя деформация.

Напряжённое состояние образцов – плоское, связь между модулями шаровых тензоров σ_0 и ε_0 принята в виде зависимости:

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0$$

Из диаграммы растяжения были найдены модуль деформации $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; удвоенный модуль сдвига $2G = 1,54 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. С появлением пластических деформаций коэффициент μ быстро возрастал и приближался к значению $\mu_p = 0,5$ уже при $\Theta \approx 1\%$, что позволяет в расчетах при обработке экспериментальных данных использовать условие несжимаемости материала. Предполагая, что материал несжимаем ($K \rightarrow \infty$) [7] компоненты тензора-девиатора напряжений и деформаций определялись по формулам:

$$\begin{cases} S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{22}}{2} \right); S_2 = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{2}} = S_3 = \sqrt{2} \cdot \sigma_{12}; S_4 = S_5 = 0 \\ \Theta_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \varepsilon_{11}; \Theta_2 = \sqrt{2} \cdot \left(\varepsilon_{22} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11} \right); \Theta_3 = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_{12}; \Theta_4 = \Theta_5 = 0 \end{cases}$$

В таблице 2 приведены некоторые численные значения, полученные в ходе эксперимента на растяжение.

№	σ , МПа	Θ , %	S, %	Time	Θ_1 , %	S_1 , МПа	ε_{11} , %	σ_{11} МПа
1	0,00	0,000	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
9	82,76	0,054	0,12	334	0,05	78,25	0,04	95,83
19	160,59	0,105	0,23	418	0,10	153,76	0,08	188,55
34	241,94	0,169	0,37	538	0,16	237,28	0,13	290,60
41	257,41	0,198	0,48	594	0,20	255,57	0,16	313,00
66	256,81	0,299	0,76	794	0,30	256,07	0,24	313,63
84	257,22	0,368	0,94	938	0,37	257,09	0,30	314,87
121	257,41	0,521	1,25	1234	0,51	257,41	0,42	315,49
138	256,65	0,590	1,36	1370	0,58	256,58	0,47	314,25
158	257,94	0,685	1,58	1530	0,67	257,92	0,54	316,12
200	270,30	0,873	1,98	1866	0,84	270,30	0,68	331,05
232	280,28	1,013	2,22	2122	0,96	280,27	0,78	343,50
302	300,79	1,328	2,89	2682	1,24	300,79	1,01	368,39
343	309,94	1,519	3,25	3010	1,41	309,93	1,15	379,59
385	320,61	1,707	3,63	3346	1,57	320,60	1,28	392,66
487	340,42	2,179	4,51	4162	1,98	340,42	1,62	416,92
593	360,23	2,690	5,47	5014	2,43	360,23	1,98	441,19
667	380,05	3,366	6,38	5606	3,01	380,05	2,46	465,46
716	400,51	4,064	7,21	6002	3,64	400,37	2,97	490,35
767	420,71	4,800	8,12	6410	4,45	420,69	3,64	515,24
836	440,01	5,857	9,34	6962	5,56	440,00	4,54	538,89

Таблица 2. Экспериментальные данные

Испытания по типу центрального веера являются базовыми и выполняться для каждой партии образцов с целью определения начальной изотропии или анизотропию

исследуемого материала. По результатам испытания выполняют построение диаграмм и оценивают точность выполнения постулата изотропии при простых нагружениях [7]. На рисунке 7 представлена общая диаграмма прослеживания процесса деформирования, на рисунке 8 график зависимости $\sigma - \varepsilon$.

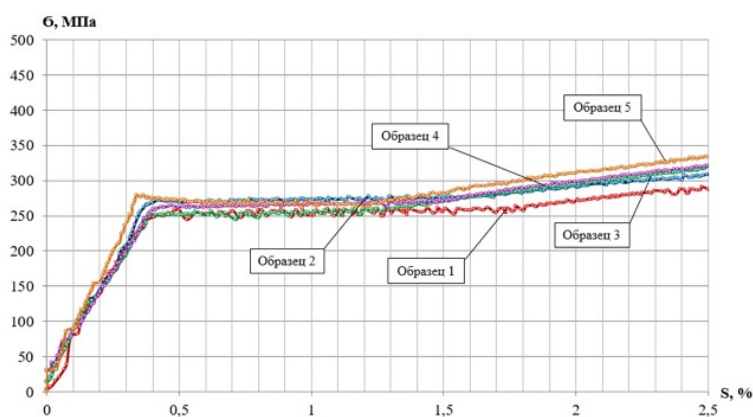


Рис. 7. Диаграммы материала

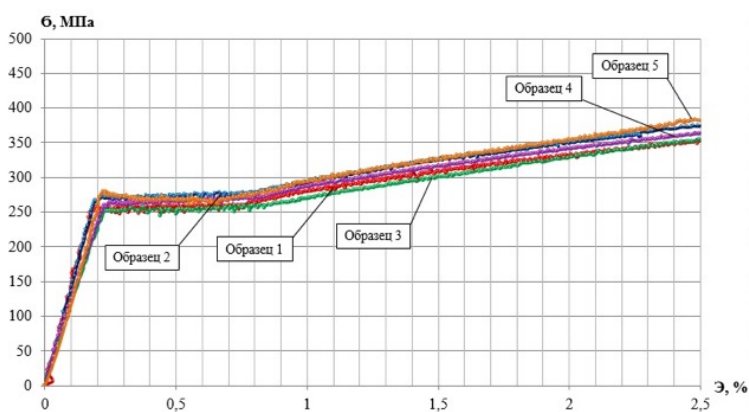


Рис. 8. Диаграммы деформирования

5. Вывод Испытания по типу центрального веера позволяют установить начальную анизотропию или изотропию путем построения диаграмм деформирования при растяжении-сжатии, кручении, внутреннем давлении и пропорциональном нагружении, определить модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, оценить точность выполнения постулата изотропии при простых нагружениях, построить единую диаграмму упрочнения материала $\sigma = \Phi(s)$. Базовые этапы являются базисом дальнейших экспериментальных исследований. Следующим этапом является сравнение экспериментальных данных с результатами численных расчетов [8], [9], [10], [11],

[12], [13], [14], [15], [16], [17]. В результате такой верификации математических моделей теории упругопластических процессов делаются выводы о достоверности аппроксимаций при моделировании сложного упругопластического деформирования для рассматриваемого класса траекторий деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патент на полезную модель RU 7202 U1, 16.07.1998. Заявка № 97108023/20 от 20.05.1997 Зубчанинов В. Г., Акимов А. В., Охлопков Н. Л. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сложном нагружении.
- [2] Зубчанинов В. Г., Охлопков Н. Л., Гараников В. В. Экспериментальная пластичность: Монография. Книга 1. Процессы сложного деформирования. Тверь: ТГТУ, 2003. 172 с.
- [3] Саврасов И.А. Электромеханическая часть автоматизированного расчетно-испытательного комплекса сн-эвм // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2022. № 1 (13). С. 56–60.
- [4] Гулятьев В. И., Зубчанинов В. Г., Саврасов И. А., Алексеев А. А. Методика экспериментального исследования пластичности поликристаллических материалов на испытательном комплексе сн-эвм // В сборнике: проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы IX Международного научного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова.
- [5] Саврасов И. А. Образцы для испытаний на автоматизированном испытательном комплексе сн-эвм: химический анализ, средства измерения и материалы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2021. № 1 (9). С. 86–90.
- [6] Гараников В. В., Зубчанинов В. Г., Охлопков Н. Л. Устройство для измерения деформаций при сложном нагружении Патент на полезную модель RU 13092 U1, 20.03.2000. Заявка № 99120485/20 от 27.09.1999.
- [7] Зубчанинов В. Г. Механика процессов пластических сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 352 с. ISBN 978-5-9221-1235-2.
- [8] Зубчанинов В. Г., Гулятьев В. И., Двужилов А. С. Исследование латуни л63 по гладкой криволинейной траектории типа “веер смещенных окружностей” // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 1 (55). С. 26–32. DOI: 10.37972/chgru.2023.55.1.004
- [9] Зубчанинов В. Г., Гулятьев В. И., Алексеев А. А., Двужилов А. С. Экспериментальные исследования сложного нагружения латуни л63 на двузвенных ломаных траекториях типа “смещенный веер” // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 1 (55). С. 18–25. DOI: 10.37972/chgru.2023.55.1.003
- [10] Зубчанинов В. Г., Гулятьев В. И., Алексеев А. А., Двужилов А.С. Экспериментальное исследование латуни л63 при сложном нагружении по двузвенным ломаным // Авиационные двигатели. 2023. № 1 (18). С. 99–103.
- [11] Алексеев А. А., Гулятьев В. И., Зубчанинов В. Г. Численный расчет упругопластического деформирования конструкционной стали по траектории типа архимедова спираль // В книге: Тезисы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Тезисы докладов. Витебск, 2022. С. 245–246.
- [12] Саврасов И. А., Гулятьев В. И., Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А. Проверка постулата изотропии в экспериментах по ортогональным траекториям деформирования в виде полукружностей // В книге: Тезисы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Тезисы докладов. Витебск, 2022. С. 246–247.
- [13] Гулятьев В. И., Саврасов И. А., Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А. Экспериментальное исследование стали 45 по траектории деформирования типа «змейка» // В книге: Тезисы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Тезисы докладов. Витебск, 2022. С. 247–248.

- [14] Гультаев В. И., Алексеев А. А., Саврасов И. А., Гараников В. В. Экспериментальная проверка постулата изотропии при деформировании стали 45 по ортогональным криволинейным траекториям постоянной кривизны // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 1 (47). С. 86–94. DOI: 10.37972/chgru.2021.1.47.008
- [15] Черемных С. В. Теоретико-экспериментальное моделирование деформирования цилиндрической оболочки из стали 45 при сложном нагружении // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 2. С. 150–160.
- [16] Субботин С. Л., Алексеев А. А. Реализация метода СН-ЭВМ в расчетах упругопластических процессов на винтовых траекториях деформирования постоянной кривизны // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2022. № 3 (53). С. 20–26. DOI: 10.37972/chgru.2022.53.3.003
- [17] Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А., Гультаев В. И. Математическое моделирование процессов сложного нагружения стали по многозвенным ломаными траекториям деформирования // В сборнике: Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела. Межвузовский сборник научных трудов. Под редакцией В.Г. Зубчанинова, А.А. Алексеева. Тверь, 2020. С. 42–47.

V. I. Gultyayev, A. N. Bulgakov

**EXPERIMENTAL STUDY OF ELASTOPLASTIC DEFORMATION
STRUCTURAL MATERIALS ON AN AUTOMATED TESTING COMPLEX
SN-EVM**

Tver State Technical University, Tver, Russia

Abstract. The article provides a description of the testing complex and experimental techniques for studying complex loading. Some questions of the study of elastoplastic deformation of materials on an automated SN-EVM complex in the mechanical testing laboratory of the Department of Strength of Materials, Theory of Elasticity and Plasticity of Tver State Technical University are presented.

Keywords: elastoplastic processes, plasticity, SN-EVM testing complex, elasticity.

REFERENCES

- [1] Patent for utility model RU 7202 U1, 07/16/1998. Application No. 97108023/20 dated May 20, 1997 Zubchaninov V. G., Akimov A. V., Okhlopov N. L. Automated complex for studying the elastic-viscoplastic properties of materials under complex loading.
- [2] Zubchaninov V. G., Okhlopov N. L., Garanikov V. V. Experimental plasticity: Monograph. Book 1. Processes of complex deformation. Tver: TSTU, 2003. 172 p.
- [3] Savrasov I.A. Electromechanical part of the automated calculation and testing complex of the computer // Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technology. 2022. No. 1 (13). pp. 56–60.
- [4] Gultyayev V. I., Zubchaninov V. G., Savrasov I. A., Alekseev A. A. Methodology for experimental study of the plasticity of polycrystalline materials on a test complex of a low-voltage computer // In the collection: problems of strength, plasticity and stability in the mechanics of deformable solids. Materials of the IX International Scientific Symposium dedicated to the 90th anniversary of the

Gultyayev Vadim Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Tver State Technical University, Tver, Russia,
Bulgakov Alexander Nikolaevich, Assistant, Tver State Technical University, Tver, Russia.

- birth of the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor V.G. Zubchaninova.
- [5] Savrasov I. A. Samples for testing on the automated testing complex of the SN-computer: chemical analysis, measuring instruments and materials // Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technology. 2021. No. 1 (9). pp. 86–90.
 - [6] Garanikov V.V., Zubchaninov V.G., Okhlopkov N.L. Device for measuring deformations under complex loading Patent for utility model RU 13092 U1, 03.20.2000. Application No. 99120485/20 dated 09/27/1999.
 - [7] Zubchaninov V. G. Mechanics of plastic media processes. M.: FIZMATLIT, 2010. 352 p. ISBN 978-5-9221-1235-2.
 - [8] Zubchaninov V. G., Gulyaev V. I., Dvuzhilov A. S. Study of brass L63 along a smooth curvilinear trajectory of the “fan of displaced circles” type // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after. AND I. Yakovleva. Series: Limit state mechanics. 2023. No. 1 (55). pp. 26–32. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.004
 - [9] Zubchaninov V. G., Gulyaev V. I., Alekseev A. A., Dvuzhilov A. S. Experimental studies of complex loading of brass L63 on two-link broken trajectories of the “displaced fan” type // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University them. AND I. Yakovleva. Series: Limit state mechanics. 2023. No. 1 (55). pp. 18–25. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.003
 - [10] Zubchaninov V. G., Gulyaev V. I., Alekseev A. A., Dvuzhilov A. S. Experimental study of L63 brass under complex loading along two-link broken lines // Aviation engines. 2023. No. 1 (18). pp. 99–103.
 - [11] Alekseev A. A., Gulyaev V. I., Zubchaninov V. G. Numerical calculation of elastoplastic deformation of structural steel along an Archimedean spiral type trajectory // In the book: Abstracts of the 55th International Scientific and Technical Conference of Teachers and students. Abstracts of reports. Vitebsk, 2022. pp. 245–246.
 - [12] Savrasov I. A., Gulyaev V. I., Zubchaninov V. G., Alekseev A. A. Verification of the isotropy postulate in experiments on orthogonal deformation trajectories in the form of semicircles // In the book: Abstracts of the 55th International scientific and technical conference of teachers and students. Abstracts of reports. Vitebsk, 2022. pp. 246–247.
 - [13] Gulyaev V.I., Savrasov I.A., Zubchaninov V.G., Alekseev A.A. Experimental study of steel 45 along a “snake” type deformation trajectory // In the book: Abstracts of the 55th International scientific and technical conference of teachers and students. Abstracts of reports. Vitebsk, 2022. pp. 247–248.
 - [14] Gulyaev V.I., Alekseev A.A., Savrasov I.A., Garanikov V.V. Experimental verification of the isotropy postulate during deformation of steel 45 along orthogonal curvilinear trajectories of constant curvature // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University AND I. Yakovleva. Series: Limit state mechanics. 2021. No. 1 (47). pp. 86–94. DOI: 10.37972/chgpu.2021.1.47.008
 - [15] Cheremnykh S.V. Theoretical and experimental modeling of deformation of a cylindrical shell made of steel 45 under complex loading // Structural mechanics of engineering structures and structures. 2022. T. 18. No. 2. P. 150–160.
 - [16] Subbotin S. L., Alekseev A. A. Implementation of the CH-computer method in the calculation of elastoplastic processes on helical deformation trajectories of constant curvature // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after. AND I. Yakovleva. Series: Limit state mechanics. 2022. No. 3 (53). pp. 20–26. DOI: 10.37972/chgpu.2022.53.3.003
 - [17] Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gulyaev V.I. Mathematical modeling of processes of complex loading of steel along multi-link broken deformation trajectories // In the collection: Mathematical modeling and experimental mechanics of a deformable solid. Interuniversity collection of scientific papers. Edited by V.G. Zubchaninova, A.A. Alekseeva. Tver, 2020. pp. 42–47.