

В. И. Гультияев, А. А. Алексеев, А. Н. Широков, А. Н. Булгаков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА СТАЛЬ 45 ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПО ПРОГРАММАМ СМЕЩЁННОГО ВЕЕРА

Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментального исследования напряженно деформированного состояния цилиндрических оболочек при реализации программ по типу смещенного веера в пространстве деформаций и описана необходимость их проведения. Показано, как величина угла излома траектории деформирования влияет на глубину “нырка” пассивной деформации при частичном упругом разгрузении материала. Статья направлена на расширение знаний о напряженно-деформируемом состоянии материалов, используемых в гражданской, машиностроительной, аэрокосмической, ядерной, биомедицинской и многих других отраслях.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, двухзвенные траектории, постулат изотропии, испытания и нагружения, напряжено-деформированное состояние оболочек.

DOI: 10.37972/chgpu.2023.56.2.009

УДК: 539.374

© Гультияев В. И., Алексеев А. А., Широков А. Н., 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,

Алексеев Андрей Алексеевич

e-mail: alexeev@bk.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия,

Широков Александр Николаевич

e-mail: kafedra_adof@mail.ru, аспирант очной формы обучения кафедры 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

1. Введение В Тверском государственном техническом университете систематически проводятся экспериментальные исследования на сложное нагружение с использованием автоматизированного испытательного оборудования. К настоящему моменту накоплено большое количество экспериментального материала по различным видам траекторий: двухзвенным и многозвенным, плоским и пространственным, ломанным и криволинейным, открытым и замкнутым [1–8]. Однако всё ещё существует ряд не полностью исследованных траекторий, среди которых была выбрана программа испытаний по типу пропорционально смещенного однопроцентного веера.

2. Постановка задачи Данная статья является первой частью из серии экспериментов, посвященных изучению смещенных вееров. Чтобы исследовать данный набор траекторий, необходима разработка и реализация экспериментальных программ деформирования по типу смещенного веера с проведением измерений напряжений и деформаций. Обработка полученных данных и анализ результатов, с целью выявления закономерностей в напряженно-деформированном состоянии оболочек в зависимости от угла, под которым происходит излом траектории, а также исследовании глубины, достигаемой “нырком”, когда материал частично разгружается.

3. Методика и программы эксперимента Эксперименты осуществлялись в Тверском государственном техническом университете с использованием автоматизированного испытательного комплекса им. А.А. Ильюшина СН-ЭВМ, расположенного в лаборатории механических испытаний на кафедре сопротивления материалов теории упругости и пластичности [9, 10].

В качестве образцов использовались тонкостенные ($h = 1,0$ мм) цилиндрические оболочки, имеющие отношение диаметра срединной поверхности к толщине стенки $D/h = 31,0$. Оболочки изготовлены из материала сталь 45 с площадкой текучести (рис. 1) в состоянии поставки, химический состав подтвержден спектральным анализом. Материал считается в достаточной степени начально-изотропным на основании проведенной серии базовых экспериментов по типу центрального веера. Серия включала пять экспериментов: первый – растяжение; второй – кручение; третий – сжатие; четвертый – пропорциональное растяжение с кручением; пятый – пропорциональное сжатие с кручением.

Компоненты тензоров напряжений σ_{ij} ($ij = 1, 2, 3$) и деформаций ε_{ij} ($ij = 1, 2, 3$) вычислялись по данным двухкомпонентного силоизмерителя и дифференциального тензометра (база 50 мм) с датчиком поперечных деформаций, закрепленного на рабочей части образца длиной $l = 110$ мм.

Значения компонент векторов напряжений, деформаций и их модулей в девиаторном пространстве напряжений Σ_3 и деформаций E_3 вычислялись по формулам:

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

где σ_{ij} , ε_{ij} ($ij = 1, 2, 3$) – компоненты тензоров напряжений и деформаций.

Эксперименты были осуществлены при нормальной температуре. Напряженное состояние оболочек рассматривалось как плоское, а материал считался несжимаемым, приближенно имеющим значение коэффициента Пуассона $\mu \rightarrow 0,5$.

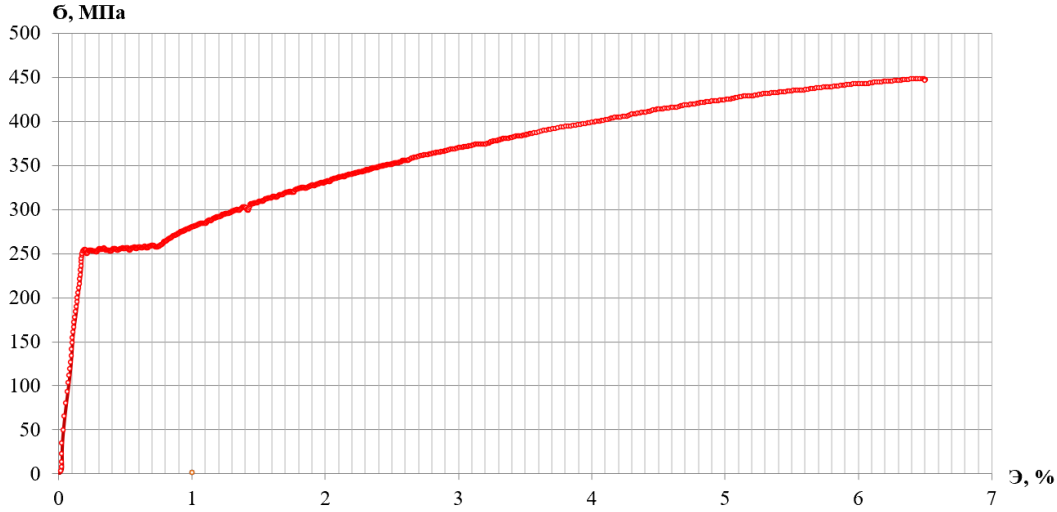


Рис. 1. Диаграмма растяжения исследуемого материала

Аппроксимация диаграммы материала с площадкой текучести, представленной на (рис. 1), может быть выполнена, согласно [10], выражениями (1):

$$\sigma = \begin{cases} 2G\varepsilon, & \text{при } \varepsilon \leq \varepsilon^T \\ \sigma^T, & \text{при } \varepsilon^T \leq \varepsilon \leq \varepsilon_*^T \\ \sigma^T + 2G_* \cdot (\varepsilon - \varepsilon_*^T) + \sigma_a \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot (\varepsilon - \varepsilon_*^T)}\right), & \text{при } \varepsilon > \varepsilon_*^T \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 2 показаны результаты: красным цветом представлена экспериментальная диаграмма деформирования, синим – соответствующая ей аппроксимационная кривая, построенная на основе формулы (1) при значениях параметров $2G = 1,45 \cdot 10^5$ МПа, $\varepsilon^T = 0,178$, $\varepsilon_*^T = 0,748$, $\sigma^T = 255$ МПа, $2G_* = 2200$ МПа, $\sigma_a = 70$ МПа, $\beta = 0,8$. Погрешность данной аппроксимации не превосходит 2%.

Для реализации программы испытаний была выбрана плоскость $\varepsilon_1\varepsilon_3$ в векторном пространстве деформаций (рис. 3). Программа представляет собой пропорционально смещенный веер из двухзвенных ломанных траекторий. В данной серии испытаний было использовано 7 образцов, прошедших проверку геометрических параметров (толщины стенки, радиуса срединной поверхности, параллельности, биения и т.д.). Излом каждой траектории осуществлялся при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1\%$, значения углов излома представлены таблице 1.

Отклик на реализуемую программу в плоскости S_1S_3 , соответствующий программе, реализовывался векторного пространства девиатора напряжений.

4. Результаты По результатам обработки полученных данных построены диаграммы $\sigma - S$ и $\sigma - \varepsilon$ (рис. 5, 6). Видно, что после излома траектории в точке К,

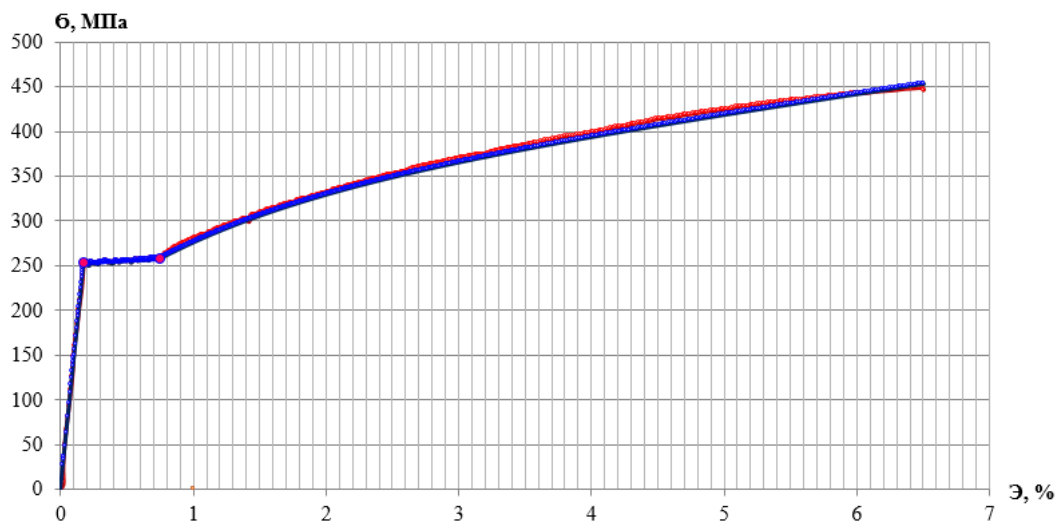


Рис. 2. Аппроксимационная диаграмма растяжения

Номер образца	Угол излома траектории	Вид нагружения после излома
4	0	Растяжение с кручением
6	45	Растяжение
7	-45	Кручение
11	90	Растяжение со знакопеременным кручением
9	-90	Сжатие с кручением
10	135	Знакопеременное кручение
8	-135	Сжатие

Таблица 1. Параметры эксперимента

соответствующей некоторому значению напряжения σ_k^T , имеют место “нырки”. Глубина, достигаемая “нырком”, когда материал частично разгружается, тем больше, чем больше угол излома траектории деформирования в точке К. Ниспадающая ветвь соответствует участку частичной сложной упругой разгрузки. Возникновение вторичных пластических деформаций происходит при достижении вторичного предела текучести $\sigma_{вт}^T$, наблюдается “протыкание” предельной поверхности.

На рисунках 7 и 8 представлены локальные диаграммы деформирования $S_n - \varepsilon_n$ ($n = 1, 3$). 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 со знакопеременным кручением, на диаграмме $S_3 - \varepsilon_3$ упругая разгрузка происходит при растяжении со знакопеременным 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.

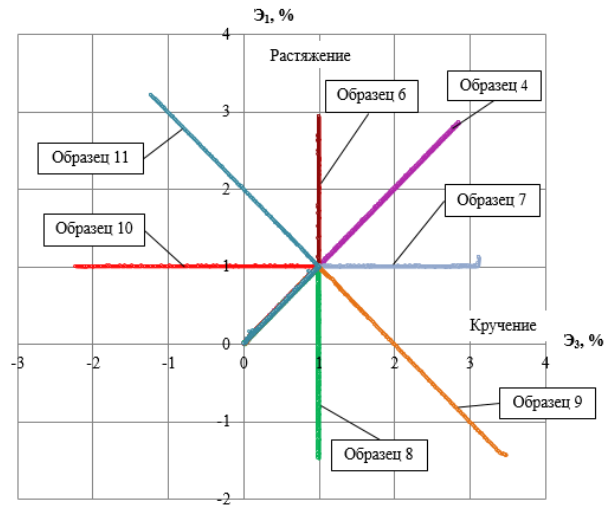


Рис. 3. Программы испытания оболочек с изломом при $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1\%$

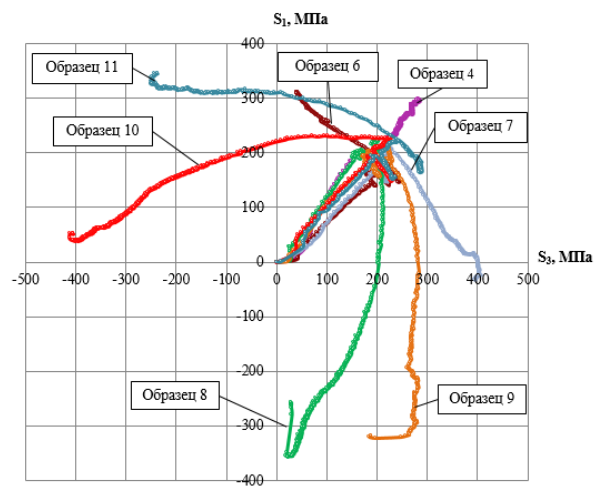


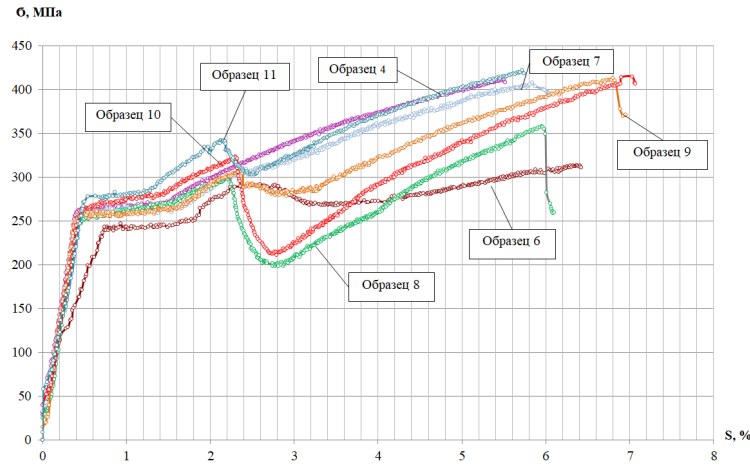
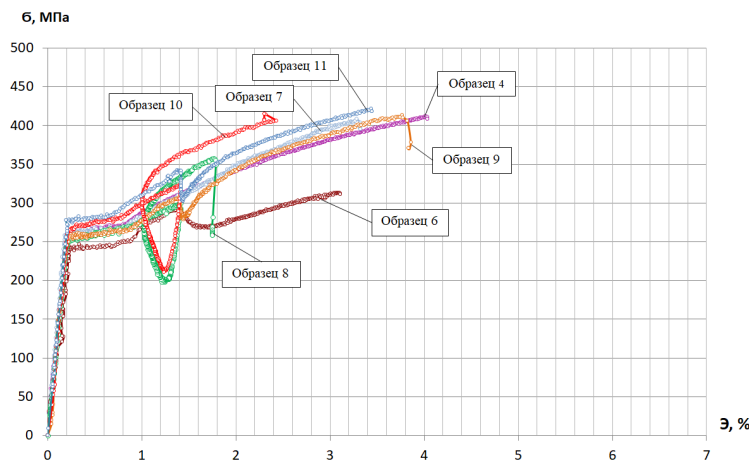
Рис. 4. Отклик на программу испытаний

Закон сложной частичной упругой разгрузки, на ниспадающем участке “нырка”, по предложению В.Г. Зубчанинова [10], может быть принят линейным (2):

$$\Delta\sigma = 2G \cdot (S - S_0) = 2G \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (2)$$

где S_0 и ε_0 – значения компонент векторов напряжений и деформаций в точке излома траектории K .

На участке восходящей ветви имеет место локально простой процесс. Закон вторичного пластического деформирования, после завершения частичной упругой разгрузки согласно гипотезе В.Г.Зубчанинова [11, 12], можно приближенно представить в виде

Рис. 5. Диаграмма $\sigma - S$ Рис. 6. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$

выражения (3):

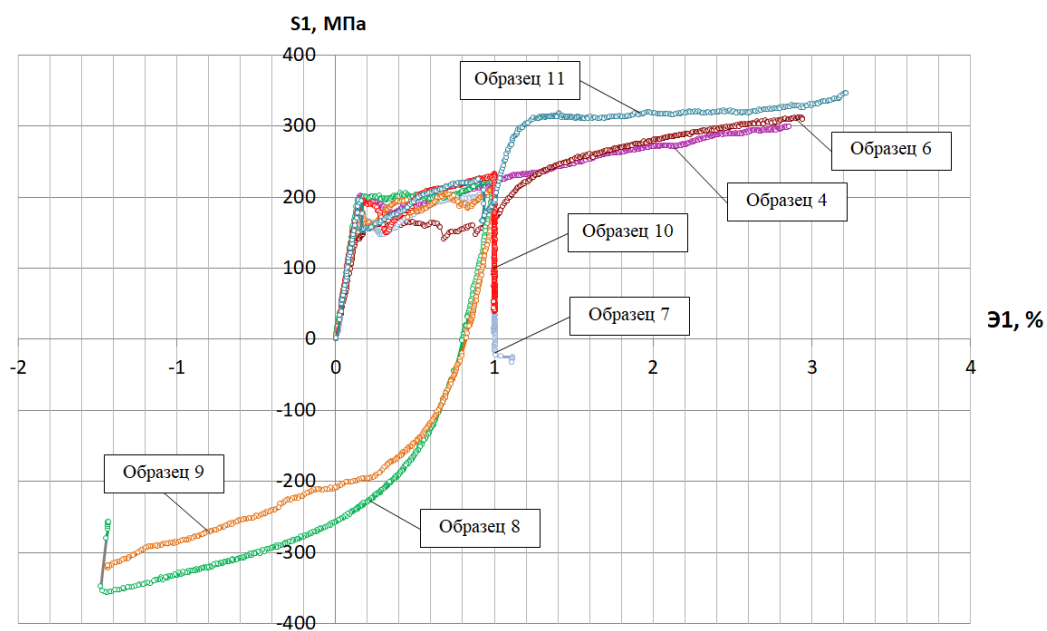
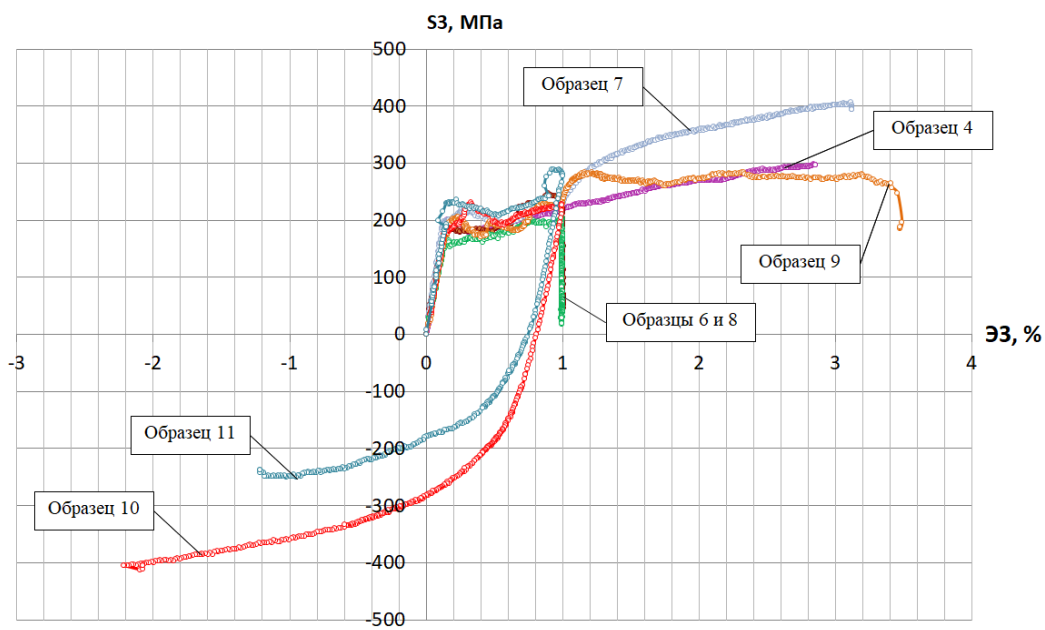
$$\sigma = \Phi(S) = \sigma_{\text{BT}}^T + 2G_* \cdot (S - S_0^{\text{BT}}) + \sigma_a \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot (S - S_0^{\text{BT}})}\right), \quad (3)$$

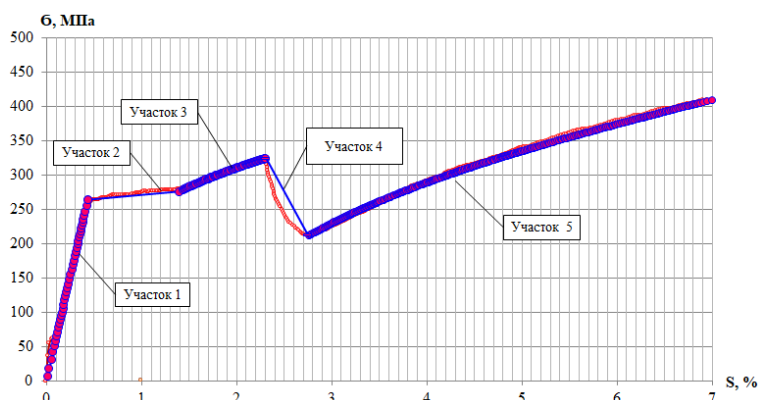
где S_0^{BT} – длина дуги в начале участка восходящей ветви при $\sigma = \sigma_{\text{BT}}^T$

На изображении 9 показаны: красным – экспериментальная диаграмма деформирования для образца №10 (угол излома 135°), синим – её теоретическая аппроксимация согласно (3). Погрешность аппроксимации при $2G_* = 3250$ МПа, $\sigma_a = 63,5$ МПа, $\beta = 0,7$ не превосходит 3%.

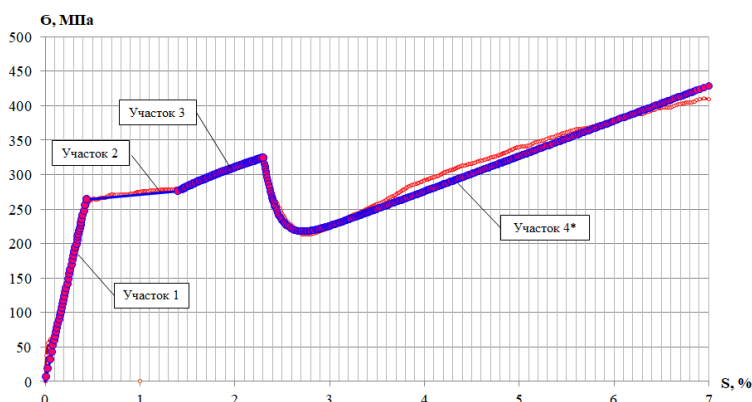
Прямолинейный участок (рис.9, участок 4) можно заменить участком 4* по формуле (4):

$$\sigma = \sigma_{\text{BT}}^T + 2G_* \cdot (S - S_0^{\text{BT}}) + \sigma_a \cdot e^{-\beta \cdot (S - S_0^{\text{BT}})} \quad (4)$$

Рис. 7. Локальная диаграмма $S_1 - \epsilon_1$ Рис. 8. Локальная диаграмма $S_3 - \epsilon_3$

Рис. 9. Диаграмма $\sigma - S$ с участком линейной аппроксимацией

Тогда при параметрах $2G_* = 5100$ МПа, $\sigma_a = 6$ МПа, $\beta = 7$ (рис. 10, участок 4*) погрешность данной аппроксимации не превосходит 6%.

Рис. 10. Диаграмма $\sigma - S$ с линейной аппроксимацией

5. Вывод Серия экспериментов по траекториям в виде смещенных вееров является продолжением и развитием работ выполненных в ТвГТУ за прошедшие годы. На основе анализа полученных результатов можно заключить, что используемые модели поведения материала для траектории с углом излома 135° демонстрируют достаточно точно соответствие с экспериментальными данными. В будущих статьях необходимо провести более широкий анализ и сравнение результатов для различных углов излома траектории и при различном начальном смещении веера.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А., Гультяев В. И. Численное моделирование процессов сложного упругопластического деформирования стали по двузвенным ломаным траекториям // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76, № 1. с. 18–25.

- [2] Экспериментальные исследования сложного нагружения латуни л63 на двузвенных ломаных траекториях типа “смещенный веер” / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев [и др.] // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. Т. 1, № 55. с. 18–25. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.003.
- [3] Экспериментальное исследование латуни л63 при сложном нагружении по двузвенным ломаным / В. Г. Зубчанинов, В. И. Гулятьев, А. А. Алексеев [и др.] // Авиационные двигатели. 2023. Т. 1, № 18. с. 99–103.
- [4] Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А., Гулятьев В. И. Моделирование процессов упругопластического деформирования материалов по многозвенным кусочно-ломаным прямолинейным траекториям // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 3. с. 203–215.
- [5] Зубчанинов В. Г., Алексеев А. А., Гулятьев В. И. Численное моделирование процессов пластического деформирования стали по многозвенным кусочно-ломаным траекториям // В сборнике: Материалы докладов 51-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов в двух томах. 2018. с. 291–293.
- [6] Алексеев А. А., Зубчанинов В. Г., Гулятьев В. И. Моделирование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по плоским траекториям // В сборнике: Упругость и неупругость. материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшин. Москва, 2021. с. 171–176.
- [7] Алексеев А. А., Зубчанинов В. Г., Гулятьев В. И. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по некоторым многозвенным траекториям // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2020. Т. 3, № 45. с. 64–71. DOI: 10.37972/chgpu.2020.65.81.006.
- [8] Процессы сложного нагружения конструкционной стали по пятизвенной кусочно-ломаной траектории деформирования / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 61. с. 32–44.
- [9] Методика экспериментального исследования пластичности поликристаллических материалов на испытательном комплексе сн-эвм / В. И. Гулятьев, В. Г. Зубчанинов, И. А. Саврасов [и др.] // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы IX Международного научного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В. Г. Зубчанинова / под ред. В. Г. Зубчанинова, А. А. Алексеева, В. И. Гулятьева. Тверь, 2021. с. 34–36.
- [10] Черемных С. В., Скудалов П. О. Установка сн-эвм для экспериментальных исследований устойчивости круговых цилиндрических оболочек при комбинированном нагружении // Техника и технология транспорта. 2019. Т. 8, № 13. с. 45.
- [11] Зубчанинов В. Г. Механика процессов пластических сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
- [12] Зубчанинов В. Г. Определяющие соотношения общей теории пластичности // Устойчивость и пластичность при сложном нагружении. Тверь: ТГТУ, 1994. с. 14–37.

V. I. Gulyaev, A. A. Alekseev, A. N. Shirokov, A. N. Bulgakov

EXPERIMENTAL STUDY OF STEEL 45 MATERIAL DURING DEFORMATION ACCORDING TO DISPLACED FAN PROGRAMS

Tver State Technical University, Tver, Russia

Abstract. The article presents the results experimental study of the stress-strain state cylindrical shells when implementing programs like a displaced fan in space of deformations and the need for their implementation is described. Shown how the magnitude of the bend angle of the deformation trajectory affects the depth of the “dive” passive deformation during partial elastic unloading of the material. Article aimed at expanding knowledge about the stress-strain state materials used in civil, mechanical engineering, aerospace, nuclear, biomedical and many other industries.

Keywords: experimental studies, two-link trajectories, isotropy postulate, testing and loading, stress-strain state of shells.

REFERENCES

- [1] Zubchaninov V. G., Alekseev A. A., Gulyaev V. I. Numerical modeling of processes of complex elastoplastic deformation of steel along two-link broken trajectories // Problems of strength and ductility. 2014. Vol. 76, no. 1. p. 18–25.
- [2] Experimental studies of complex loading of brass L63 on two-link broken trajectories of the “displaced fan” type / V. G. Zubchaninov, V. I. Gulyaev, A. A. Alekseev et al. // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after. AND I. Yakovleva. Series: Limit State Mechanics. 2023. Vol. 1, no. 55. p. 18–25. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.003.
- [3] Experimental study of brass L63 under complex loading along two-link broken lines / V. G. Zubchaninov, V. I. Gulyaev, A. A. Alekseev et al. // Aircraft engines. 2023. Vol. 1, no. 18. p. 99–103.
- [4] Zubchaninov V. G., Alekseev A. A., Gulyaev V. I. Modeling of processes of elastoplastic deformation of materials along multi-link piecewise broken rectilinear trajectories // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2017. no. 3. p. 203–215.
- [5] Zubchaninov V. G., Alekseev A. A., Gulyaev V. I. Numerical modeling of the processes of plastic deformation of steel along multi-link piecewise broken trajectories // In the collection: Materials of reports of the 51st international scientific and technical conference of teachers and students in two volumes. 2018. p. 291–293.
- [6] Alekseev A. A., Zubchaninov V. G., Gulyaev V. I. Modeling of processes of complex elastoplastic deformation of materials along flat trajectories // In the collection: Elasticity and inelasticity. materials of the International Scientific Symposium on the Problems of Mechanics of Deformable Bodies, dedicated to the 110th anniversary of the birth of A. A. Ilyushin. Moscow, 2021. p. 171–176.
- [7] Alekseev A. A., Zubchaninov V. G., Gulyaev V. I. Experimental and theoretical study of processes of complex elastoplastic deformation of materials along some multi-link trajectories // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after. AND I. Yakovleva. Series: Limit State Mechanics. 2020. Vol. 3, no. 45. p. 64–71. DOI: 10.37972/chgpu.2020.65.81.006.

Gulyaev Vadim Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Tver State Technical University, Tver, Russia,

Alekseev Andrey Alekseevich, Cand. Tech. Sci., Tver State Technical University, Tver, Russia.

Shirokov Aleksandr Nikolaevich, Post Graduate Student, Tver State Technical University, Tver, Russia.

Bulgakov Alexander Nikolaevich, Assistant, Tver State Technical University, Tver, Russia.

- [8] Processes of complex loading of structural steel along a five-link piecewise broken deformation path / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, V. I. Gulyaev et al. // Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics. 2019. no. 61. p. 32–44.
- [9] Method of experimental study of the plasticity of polycrystalline materials on the SN-computer testing complex / V. I. Gulyaev, V. G. Zubchaninov, I. A. Savrasov et al. // 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 birth of the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Professor V. G. Zubchaninov / Ed. by V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, V. I. Gulyaev. Tver, 2021. p. 34–36.
- [10] Cheremnykh S. V., Skudalov P. O. Installation of SN-computers for experimental studies of the stability of circular cylindrical shells under combined loading // Engineering and technology of transport. 2019. Vol. 8, no. 13. p. 45.
- [11] Zubchaninov V. G. Mechanics of plastic processes. M.: FIZMATLIT, 2010.
- [12] Zubchaninov V. G. Constitutive relations of the general theory of plasticity // Stability and ductility under complex loading. Tver: TSTU, 1994. p. 14–37.