

В. Г. Зубчанинов, В. И. Гультияев, А. А. Алексеев, А. С. Двужилов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛАТУНИ Л63 НА ДВУЗВЕННЫХ ЛОМАНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ТИПА “СМЕЩЕННЫЙ ВЕЕР”

*Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия*

**Аннотация.** Представлены экспериментальные результаты исследования сложного нагружения материала латуни Л63 по двузвенным ломаным по типу “смещенного веера”. Экспериментальные исследования проводились на автоматизированном экспериментально-расчетном комплексе СН-ЭВМ. Представлены результаты экспериментов: траекторий с углами излома  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  и длиной первого звена  $\Theta_1=3\%$ . Исследованы скалярные и векторные свойства материала латуни Л63. Предложены варианты аппроксимации диаграмм деформирования при простом и сложном нагружениях.

**Ключевые слова:** пластичность, экспериментальные данные, траектория деформирования, векторные и скалярные свойства материала.

DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.003

УДК: 539.374

В данной статье приводятся экспериментальные исследования упруго-пластического деформирования материала латуни Л63 при сложном нагружении по типу смещенного веера двузвенных ломаных траекторий. Были получены новые экспериментальные результаты по установлению закономерностей упругопластического деформирования латуни для траекторий по типу двузвенных ломаных.

---

© Зубчанинов В. Г., Гультияев В. И., Алексеев А. А., Двужилов А. С., 2023

*Зубчанинов Владимир Георгиевич*

**e-mail:** vlgzub@gmail.com, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия.

*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:** alexeew@bk.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия. *Двужилов Антон Сергеевич*

**e-mail:** anton\_in\_tver, ассистент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия.

Поступила 10.01.2023

Экспериментальные исследования проводились на тонкостенных трубчатых образцах из латуни Л63. Испытания выполнялись на автоматизированном комплексе СН-ЭВМ (рис. 1) в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета. На рис. 1 представлен общий вид испытательного комплекса СН-ЭВМ.



Рис. 1.

Тонкостенные трубчатые оболочки имели длину рабочей части  $l = 110$  мм, толщину стенки  $h = 1$  мм и радиус срединной поверхности  $r = 15,5$  мм.

В девиаторных подпространствах напряжений и деформаций элементы векторов напряжений и деформаций  $S_k (k = 1, 3), \Theta_k (k = 1, 3)$  определялись по формулам [1–7].

$$S_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} S_{11} = \sqrt{\frac{3}{2}} (\sigma_{11} - \sigma_0), \quad S_3 = \sqrt{2} S_{12} = \sqrt{2} \sigma_{12} \quad (1)$$

$$\Theta_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \Theta_{11} = \sqrt{\frac{3}{2}} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0), \quad \Theta_3 = \sqrt{2} \Theta_{12} = \sqrt{2} \varepsilon_{12}$$

где  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, S_{ij}, \Theta_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  – компоненты тензоров и тензоров-девиаторов напряжений и деформаций соответственно.  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{ii}/3, \sigma_0 = \sigma_{ii}/3$ , – средние деформация и напряжения. Модули векторов напряжений и деформаций, равные модулям девиаторов напряжений и деформаций определялись по формулам:

$$\sigma = \sqrt{S_1^2 + S_3^2}, \quad \Theta = \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_3^2}, \quad (2)$$

Материал образцов – двухкомпонентная латунь Л63 в состоянии поставки. Как показал эксперимент на растяжение, на диаграмме растяжения площадка текучести отсутствует, определялся условный предел текучести при  $\Theta = 0,2\%$ , который составил  $\sigma = 158$  МПа (рис. 2)

Диаграмма растяжения материала  $\sigma = \Phi(\Theta)$  без площадки текучести может быть аппроксимирована выражениями:

$$\sigma = \begin{cases} 2G\vartheta, & \text{при } \vartheta \leq \vartheta^T \\ \sigma^T + 2G_*(\vartheta - \vartheta_*^T) + \sigma_a(1 - e^{-\beta(\vartheta - \vartheta_*^T)}), & \text{при } \vartheta > \vartheta_*^T \end{cases} \quad (3)$$

где  $\vartheta^T = \sigma^T / 2G$ ,  $\vartheta_*^T$  – значение  $\vartheta$  в конце площадки текучести.

$2G$  – удвоенный модуль сдвига,  $G_*$ ,  $\sigma^T$ ,  $\sigma_a, \beta$  – параметры аппроксимации.

На рис. 2 представлена экспериментальная диаграмма латуни Л63 и соответствующая ей аппроксимационная диаграмма, которая построена на основании (3) при значении параметров  $\sigma^T = 158$  МПа,  $2G_* = 1644$  МПа,  $\sigma_a = 40,34$  МПа,  $\beta = 70$ . При этом погрешность аппроксимации при развитых пластических деформациях составляет не больше 3%.

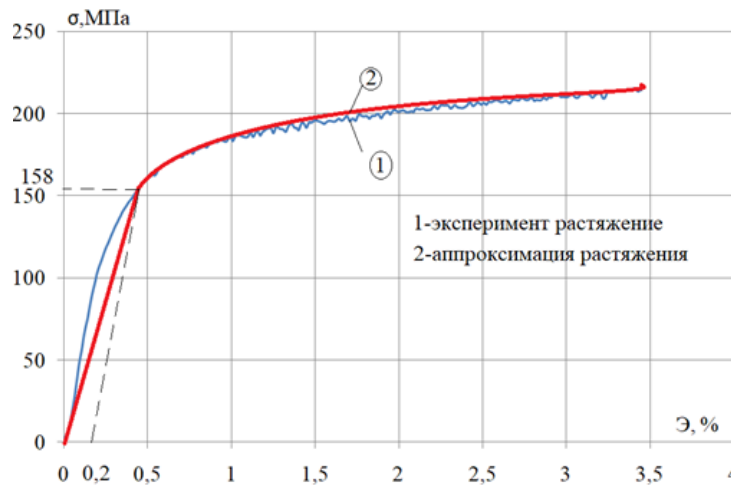


Рис. 2.

Программа экспериментов осуществлялась в векторном пространстве деформаций в плоскости  $\vartheta_1\vartheta_3$ , а соответствующий ей отклик по напряжениям осуществлялся в плоскости  $S_1S_3$  векторного пространства девиатора напряжений. Программа серии экспериментов с точками излома при  $\vartheta_1^0 = 3\%$  приведены на рис. 3.

Были проведены экспериментальные исследования по двузвенным ломаным траекториям деформирования с углами излома  $90^\circ$ ;  $135^\circ$ ;  $180^\circ$ . После излома траектории при угле  $90^\circ$  на втором звене испытуемый образец был подвергнут кручению при  $\vartheta_1 = \text{const}$ , при угле  $135^\circ$  – одновременному кручению и сжатию, при угле  $180^\circ$  – знакопеременному нагружению с упругой разгрузкой.

На рис. 4 и 5 приведены диаграммы  $\sigma - s$  и  $\sigma - \vartheta$ . Из рисунка видно, что при изломе траектории на диаграммах наблюдаются “нырки” напряжений, которые при угле излома  $90^\circ$  составили 23 МПа, при угле излома  $135^\circ$  – 42 МПа, при угле излома  $180^\circ$  – 174 МПа. Опускающаяся часть “нырка” соответствовала неполной упругой сложной разгрузке до минимума напряжения  $\sigma_{BT}^T$ , при котором происходит “протыкание” предельной поверхности и создаются вторичные пластические деформации. Напряжение  $\sigma_{BT}^T$  названо вторичным пределом текучести. При угле излома  $90^\circ$  получено  $\sigma_{BT}^T = 174$  МПа, угле  $135^\circ$  –  $\sigma_{BT}^T = 134$  МПа, угле  $180^\circ$  –  $\sigma_{BT}^T = 3,3$  МПа. На рис. 6 и 7

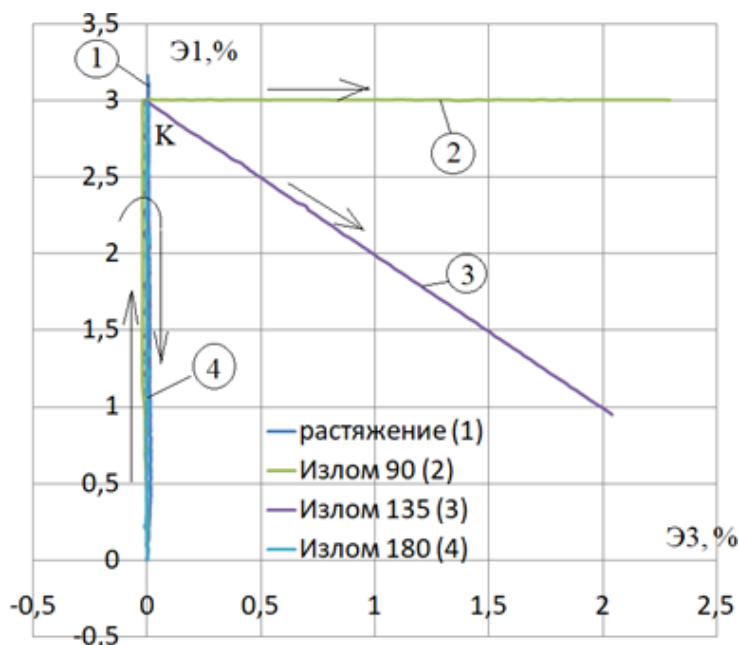


Рис. 3.

представлены локальные диаграммы деформирования  $S_1-\epsilon_1$  и  $S_3-\epsilon_3$ . На ниспадающей части “нырка” происходит упругая разгрузка на диаграмме  $S_1-\epsilon_1$  и упругое нагружение на диаграмме  $S_3-\epsilon_3$  при кручении образца (рис. 6, 7). На восходящей ветви “нырка” продолжается упругая разгрузка по растяжению-сжатию, однако происходит активное пластическое деформирование от кручения, что и является причиной прекращения частичной упругой разгрузки материала (рис. 6, 7).

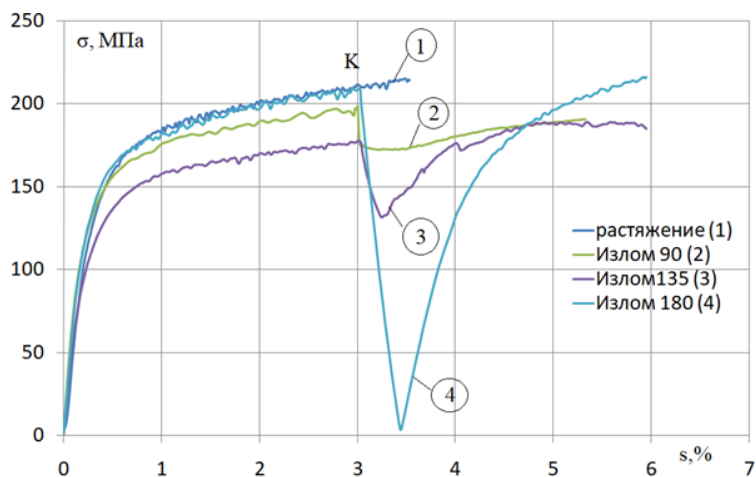


Рис. 4.

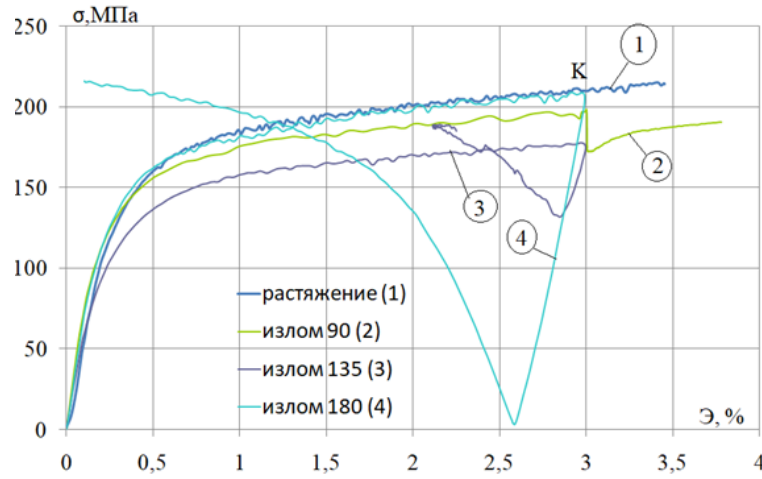


Рис. 5.

Из рис. 4, 5 можно увидеть практически линейную частичную разгрузку. Поэтому по предложению В.Г.Зубчанинова закон сложной частичной упругой разгрузки может быть принят линейным для данного материала латунь.

$$\Delta\sigma = 2G(S - S_0) = 2G(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0) \quad (4)$$

где  $S_0$ ,  $\mathcal{E}_0$  – значения  $S$  и  $\mathcal{E}$  в точке  $K$  излома траектории.

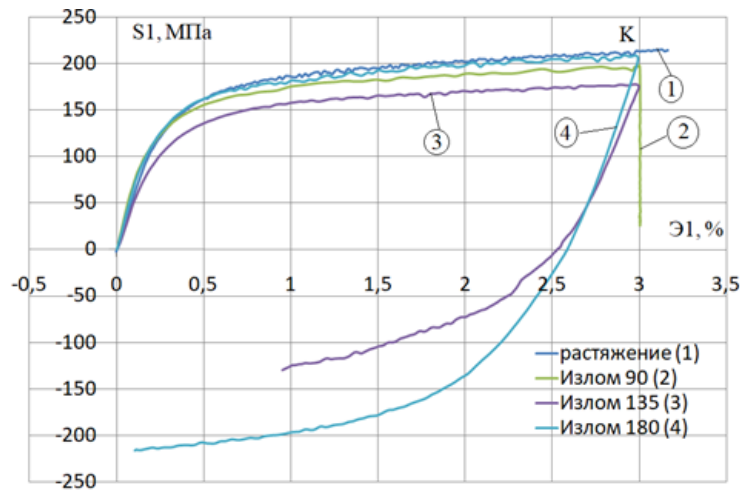


Рис. 6.

После окончания частичной разгрузки на участке вторичного пластического деформирования (после  $\sigma_{\text{ВТ}}^T$  согласно предположения В. Г. Зубчанинова зависимость  $\sigma = \Phi(s)$  выражается следующим образом:

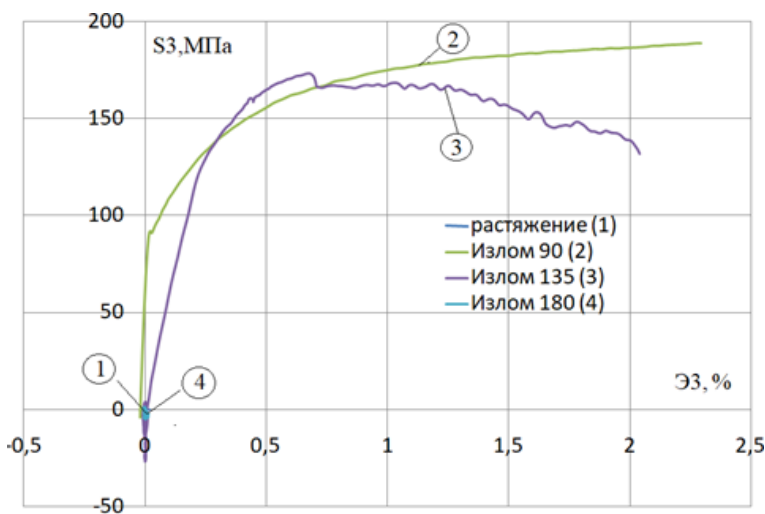


Рис. 7.

$$\sigma = \Phi(s) = \sigma_{BT}^T + 2G_*(s - s_0^\gamma) + \sigma_a [1 - e^{-\beta(s - s_0^\gamma)}] \quad (5)$$

где длина дуги  $s_0^\gamma$ , которая соответствует началу участка при  $\sigma = \sigma_{BT}^T$ .  $2G_* = 1577$  МПа,  $\sigma_a = 65,06$  МПа,  $\beta = 70$

На рис. 8 можно увидеть экспериментальную диаграмму деформирования для угла излома  $\vartheta_1^0 = 135^\circ$  и ее теоретическую аппроксимацию на основании формулы 6. Из рис. 8 видно, что применяемые аппроксимации хорошо соответствуют данным эксперимента.

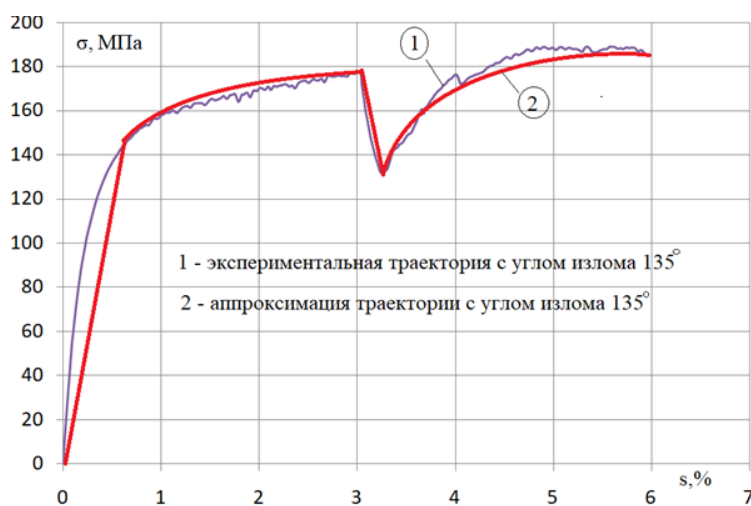


Рис. 8.

Векторные свойства материала для углов излома  $90^\circ$ ;  $135^\circ$ ;  $180^\circ$  траектории можно увидеть на рис. 9, где представлены зависимости угла сближения  $\varphi_1$  от приращения длины дуги траектории  $\Delta s$  после точки излома.

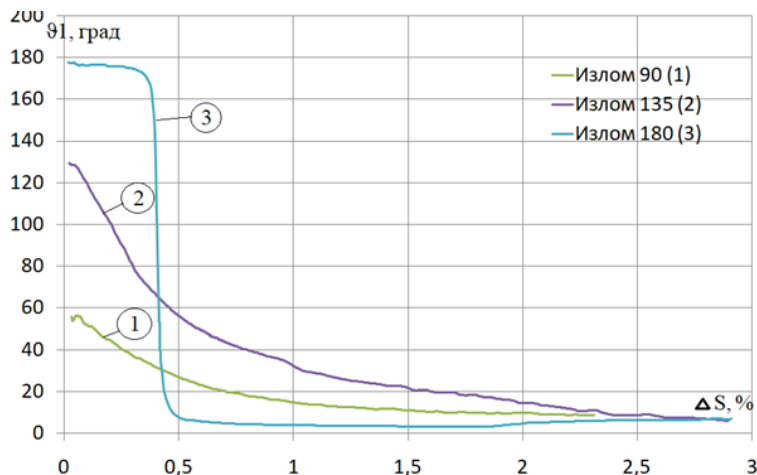


Рис. 9.

В процессе дальнейшего нагружения угол  $\varphi_1$  становится стабильным и стремится к нулю (рис. 9).

Результаты исследований планируется использовать при построении математической модели теории процессов упругопластического деформирования для материала латунь Л63.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 273 с.
- [2] Зубчанинов В. Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. 352 с.
- [3] Зубчанинов В. Г. Общая математическая теория пластичности и постулаты макроскопической определенности и изотропии А.А. Ильюшина // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2018. Т. 5. С. 29–46.
- [4] Inelasticity V. V. Variants of the theory. New York: Begell House, 2013.
- [5] Пелешко В. А. Прикладной и инженерный варианты теории упругопластических процессов активного сложного нагружения. Часть 2: Идентификация и верификация // Изв. РАН. МТТ. 2016. Т. 1. С. 110–135.
- [6] Молодцов И. Н. Прикладные вопросы теории упругопластических процессов А. А. Ильюшина // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2020. № 5. С. 33–8.
- [7] Experimental verification of postulate of isotropy and mathematical modeling of elastoplastic deformation processes following the complex angled nonanalytic trajectories / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, E. G. Alekseeva et al. // Materials Physics and Mechanics. 2017. Vol. 32, no. 3. p. 298–304.

V. G. Zubchaninov, V. I. Gulyaev, A. A. Alekseev, A. S. Dvuzhilov

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE COMPLEX LOADING OF L63  
BRASS ON TWO-LINK POINTED PATH TYPE "OFFSET FAN"**

*Tver State Technical University, Tver, Russia*

**Abstract.** Experimental results of the study are presented complex loading of the material brass L63 by two-link broken lines by type “displaced fan”. Experimental studies were carried out on automated experimental and computational complex SN-EVM. Represented experimental results: trajectories with break angles  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  and the length of the first link is  $E1=3\%$ . The scalar and vector properties of the L63 brass material are studied. Suggested options for approximating deformation diagrams for simple and complex loading.

**Keywords:** plasticity, experimental data, trajectory deformations, vector and scalar properties of the material.

**REFERENCES**

- [1] Ilyushin A. A. Plasticity. Fundamentals of General Mathematical Theory. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963. 273 p.
- [2] Zubchaninov V. G. Mechanics of plastic media processes. M.: Fizmatlit, 2010. 352 p.
- [3] Zubchaninov V. G. General mathematical theory of plasticity and postulates of macroscopic definability and isotropy A.A. Ilyushin // Bulletin of the Moscow University. Series 1. Mathematics. Mechanics. 2018. Vol. 5. P. 29–46.
- [4] Inelasticity B. V. Variants of the theory. New York: Begell House, 2013.
- [5] Peleshko V. A. Applied and engineering versions of the theory of elastic-plastic processes of active complex loading. Part 2: Identification and verification // Izv. RAN. MTT. 2016. Vol. 1. P. 110–135.
- [6] Molodtsov I. N. Applied Problems of the Theory of Elastic-Plastic Processes by A. A. Ilyushin // Bulletin of the Moscow University. Series 1. Mathematics. Mechanics. 2020. no. 5. P. 33–8.
- [7] Experimental verification of postulate of isotropy and mathematical modeling of elastoplastic deformation processes following the complex angled nonanalytic trajectories / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, E. G. Alekseeva et al. // Materials Physics and Mechanics. 2017. Vol. 32, no. 3. p. 298–304.

---

*Zubchaninov Vladimir Georgievich*, Dr. Tech. Sci., Professor, Tver State Technical University, Tver, Russia.

*Gulyaev Vadim Ivanovich*, Dr. Tech. Sci., Professor, Tver State Technical University, Tver, Russia.

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

*Dvuzhilov Anton Sergeevich*, Assistant, Tver State Technical University, Tver, Russia.