

Экспериментальное исследование латуни Л63 при сложном нагружении по двузвенным ломаным

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

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

e-mail: anton_in_tver@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования образцов из латуни Л63 при сложном нагружении в упругопластической области по двузвенным ломаным траекториям типа смещенного веера. Испытания выполнены на автоматизированном экспериментальном комплексе для сложного нагружения СН-ЭВМ. Представлены траектории с углами излома 45, 90, 135° и длиной первого звена 2%. Были исследованы скалярные и векторные свойства латуни Л63. Предложены варианты аппроксимации диаграмм деформирования при простом и сложном нагружении.

Ключевые слова: пластичность, эксперимент, траектория деформирования, векторные свойства материала, скалярные свойства материала

Experimental study of L63 brass under complex loading by two-link polylines

Zubchaninov V.G., Gulytyaev V.I., Alekseyev A.A., Dvuzhilov A.S.

Tver State Technical University, Tver

Results of the experimental study of complex loading in the elastic-plastic region of L63 brass along two-link polylines of the “displaced fan” type are presented. Experimental studies were carried out on the automated experimental system for complex loading SN-EVM. Trajectories with bend angles of 45, 90, 135° and the length of the first link of 2% are presented. Vector and scalar properties of the L63 brass were investigated. Variants of approximation of deformation diagrams under simple and complex loads were proposed.

Keywords: plasticity, experiment, deformation trajectory, vector material properties, scalar material properties

В лабораторном комплексе механических испытаний Тверского государственного технического университета проведены экспериментальные исследования с установлением закономерностей упругопластического деформирования двухкомпонентного сплава латуни Л63 (63% меди, 35% цинка) при сложном нагружении по типу смещенного веера двузвенных ломаных траекторий.

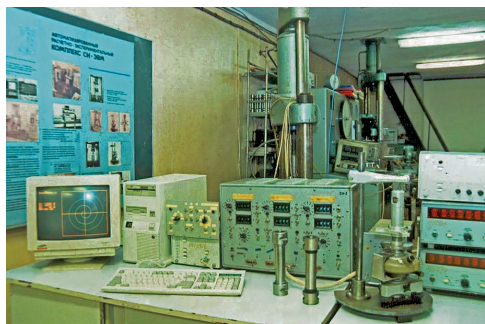


Рис. 1. Экспериментальный комплекс СН-ЭВМ

Испытания выполняли на уникальном автоматизированном экспериментальном комплексе для сложного нагружения СН-ЭВМ им. А.А. Ильюшина (рис. 1).

Объектами испытаний были тонкостенные трубчатые образцы, представляющие собой цилиндрические оболочки (рис. 2). Образцы с толщиной стенки $h = 1$ мм и радиусом срединной поверхности $r = 15,5$ мм имели длину рабочей части $l = 110$ мм. Материал образцов – двухкомпонентная латуни Л63 в состоянии поставки.

При испытаниях на сложное нагружение в стенках образцов реализуется плоское напряженно-деформированное состояние, для которого в девиаторных подпространствах напряжений и деформаций элементы векторов напряжений и деформаций S_k ($k = 1, 3$), \mathcal{E}_k ($k = 1, 3$) определялись по формулам [1; 2]:

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

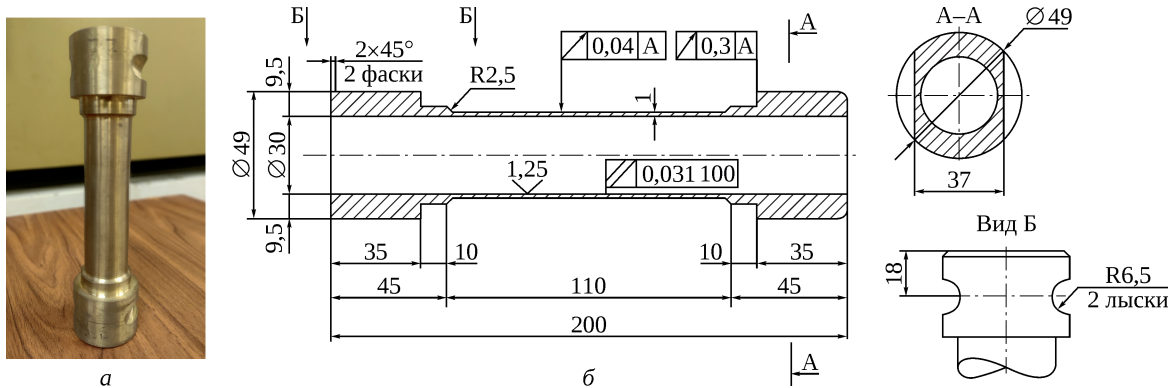


Рис. 2. Тонкостенный трубчатый образец (а) и его чертёж (б)

$$\mathcal{E}_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathcal{E}_{11} = \sqrt{\frac{3}{2}} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0); \quad \mathcal{E}_3 = \sqrt{2} \mathcal{E}_{12} = \sqrt{2} \varepsilon_{12}, \quad (1)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензоров напряжений и деформаций; S_{ij} и \mathcal{E}_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензоров-девиаторов напряжений и деформаций; $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$ и $\varepsilon_0 = \varepsilon_{ii}/3$ – средние напряжение и деформация. Модули тензоров напряжений и деформаций, которые равны абсолютным значениям тензоров-девиаторов напряжений и деформаций определялись по формулам

$$\sigma = \sqrt{S_1^2 + S_3^2}; \quad \mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_3^2}. \quad (2)$$

В результате испытания на одноосное простое растяжение была получена диаграмма деформирования материала Л63, на которой площадка текучести отсутствует (рис. 3). Из обработки диаграммы был определен условный предел текучести при $\mathcal{E} = 0,2\%$, составивший $\sigma^T = 158$ МПа.

Для аппроксимации диаграммы растяжения $\sigma = \Phi(\mathcal{E})$ для материала без площадки текучести предлагается использовать выражения

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

где $\mathcal{E}^T = \sigma^T / 2G$ – значение \mathcal{E} в конце упругого участка диаграммы; $2G$ – удвоенный модуль сдвига; G_* , σ^T , σ_a и β – параметры аппроксимации.

Расчетная диаграмма на рис. 3 построена по зависимости (3) при следующем значении параметров: $\mathcal{E}^T = 0,2\%$, $\sigma^T = 158$ МПа, $2G = 0,79 \cdot 10^5$ МПа, $\beta = 70$, $\sigma_a = 40,34$ МПа, $2G_* = 1644$ МПа. При этом погрешность аппроксимации на участке упрочнения материала при развитых пластических деформациях составляет не больше 3%.

Была проведена серия экспериментов с нагружением образцов по двузвенным ломаным траекториям с точками излома (К) при длине первого звена $\mathcal{E}_1 = 2\%$ (рис. 4). Эксперименты осуществлялись в векторном

пространстве деформаций в плоскости $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$, а соответствующий им отклик по напряжениям определялся в векторном пространстве тензора-девиатора напряжений на плоскости $S_1 - S_3$.

Углы излома составляли 45, 90 и 135°. После излома траектории с углом 45° на втором звене испытываемый тонкостенный образец был подвергнут совместному растяжению и кручению, с углом 90° – кручению при $\mathcal{E}_1 = \text{const}$, а с углом 135° – одновременному кручению и сжатию.

На рис. 5 приведены диаграммы деформирования $\sigma - s$ и $\sigma - \mathcal{E}$, где s – длина дуги траектории вектора деформаций (траектории деформирования). При изломе

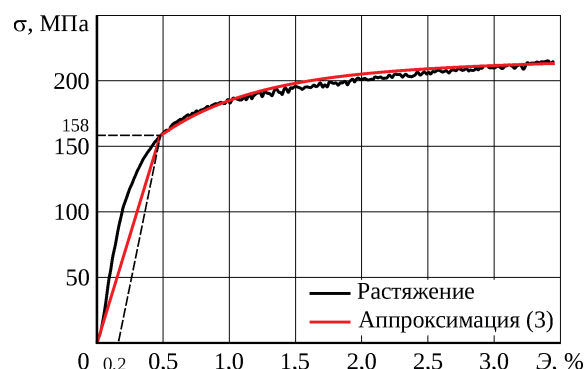


Рис. 3. Диаграмма деформирования образца при одноосном растяжении

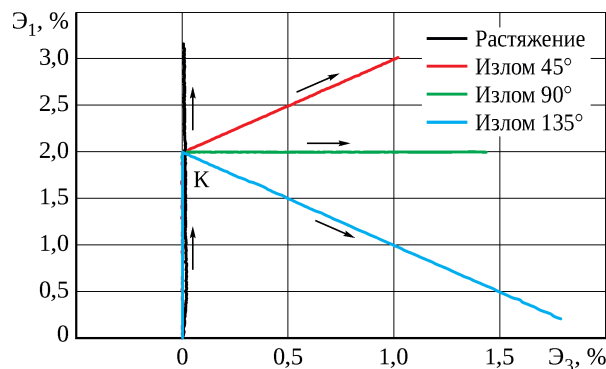


Рис. 4. Программа деформирования образцов по двузвенным ломаным траекториям

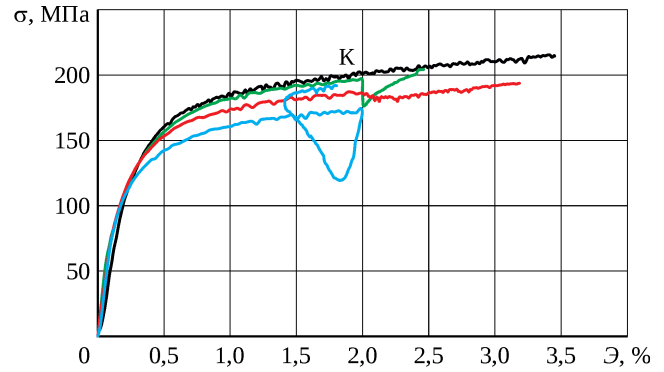
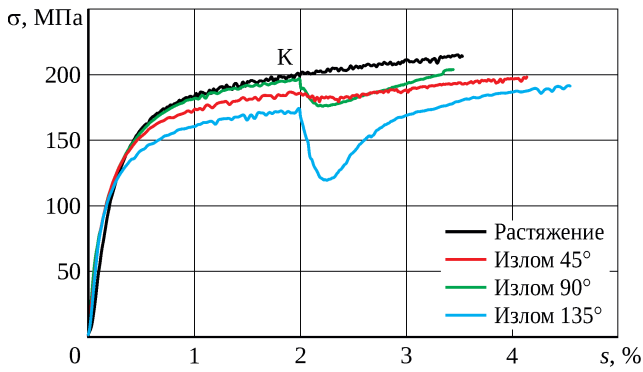


Рис. 5. Диаграммы деформирования образцов

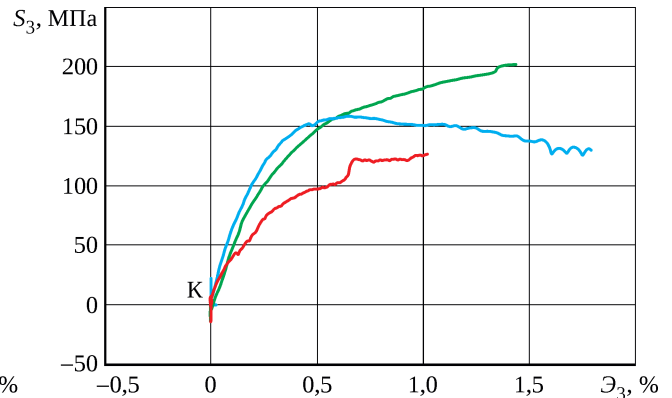
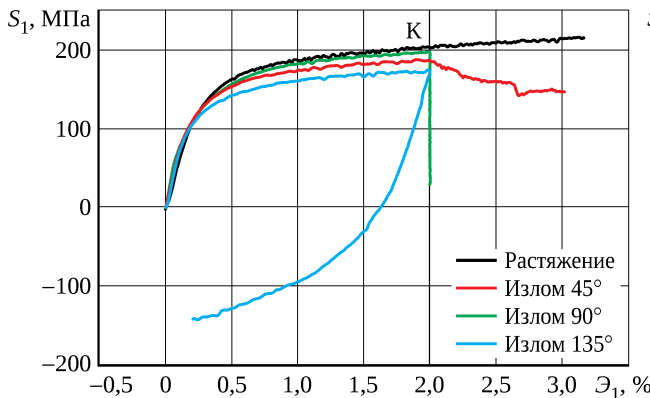


Рис. 6. Локальные диаграммы деформирования образцов

траектории на диаграммах наблюдаются нырки напряжений (уменьшение модуля вектора напряжений), которые при угле излома 45° составили 8 МПа, при угле излома 90° – 18,5 МПа, а при угле излома 135° – 52,7 МПа. Нисходящая часть нырка напряжений на диаграммах $\sigma - s$ и $\sigma - \mathcal{E}$ до минимума напряжений $\sigma_{\text{вт}}^T$ соответствовала неполной упругой сложной разгрузке. При этом значении напряжений $\sigma_{\text{вт}}^T$ происходит протыкание предельной поверхности текучести и создаются вторичные пластические деформации. Напряжение $\sigma_{\text{вт}}^T$ названо вторичным пределом текучести. При угле излома 45° получен $\sigma_{\text{вт}}^T = 181,8$ МПа, угле 90° – $\sigma_{\text{вт}}^T = 176,4$ МПа, угле 135° – $\sigma_{\text{вт}}^T = 120,3$ МПа. На рис. 6 представлены локальные диаграммы деформирования $S_1 - \mathcal{E}_1$ и $S_3 - \mathcal{E}_3$. На нисходящей части нырка напряжений наблюдается упругое нагружение на диаграмме $S_3 - \mathcal{E}_3$ при кручении образца и упругая разгрузка – на диаграмме $S_1 - \mathcal{E}_1$. На восходящей части нырка продолжается упругая разгрузка при растяжении-сжатии, но при кручении осуществляется активное пластическое деформирование, что и является причиной завершения частичной упругой разгрузки (см. рис. 6).

На рис. 5 после точки излома с углом 135° можно увидеть линейную частичную разгрузку. Поэтому, по предложению В.Г. Зубчанинова, для данного материала (латунь Л63) линейным может быть принят закон сложной частичной упругой разгрузки:

$$\Delta\sigma = 2G(s - s_0) = 2G(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0), \quad (4)$$

где s_0 и \mathcal{E}_0 – значения длины дуги (s) и модуля вектора деформаций (\mathcal{E}) в точке излома траектории (К).

По окончании частичной разгрузки на участке вторичного пластического деформирования (после $\sigma_{\text{вт}}^T$), согласно предложению В.Г. Зубчанинова, зависимость $\sigma = \Phi(s)$ выражается следующим образом:

$$\sigma = \Phi(s) = \sigma_{\text{вт}}^T + 2G_*(s - s_0^y) + \sigma_a(1 - e^{-\beta(s - s_0^y)}), \quad (5)$$

где s_0^y – длина дуги при $\sigma = \sigma_{\text{вт}}^T$, соответствующая началу участка вторичного пластического деформирования.

На рис. 7 представлена экспериментальная диаграмма деформирования для угла излома 135° и ее аппроксимация на основании формулы (5) при $s_0^y = 2,21\%$,

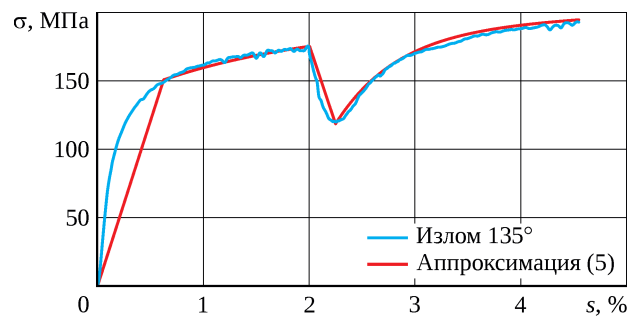


Рис. 7. Диаграмма деформирования образца при угле излома траектории 135°

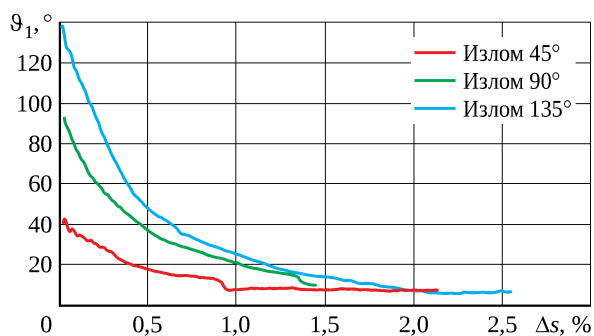


Рис. 8. Зависимость угла сближения от приращения длины дуги траектории

$\sigma_{\text{вт}}^T = 120,3$ МПа, $2G_* = 1644$ МПа, $\sigma_a = 40,34$ МПа, $\beta = 70$. Полученный результат удовлетворительно соответствует данным эксперимента.

Зависимость $\sigma - s$ отражает скалярные свойства материала, а влияние векторных свойств на процесс упруго-пластического деформирования определяет угол сближения (ϑ_1), показывающий величину отклонения вектора напряжений от касательной к траектории деформирования в каждой ее точке:

$$\cos \vartheta_1 = \frac{1}{\sigma \Delta s} \left[S_1 (\vartheta_1 - \vartheta_1^0) + S_3 (\vartheta_3 - \vartheta_3^0) \right], \quad (6)$$

где ϑ_1^0 и ϑ_3^0 – значения ϑ_1 и ϑ_3 в начале второго звена (в точке излома) траектории деформирования. На рис. 8 представлены диаграммы зависимости угла сближения ϑ_1 от приращения длины дуги траектории Δs после точки ее излома.

В процессе дальнейшего нагружения на втором звене угол ϑ_1 становится стабильным и стремится к постоянному значению $7 \dots 8^\circ$ (см. рис. 8).

Аналогичные исследования были проведены для траекторий типа смещенного веера с длиной первого звена 3%. Получено качественное соответствие серий экспериментов друг другу. Результаты исследований авторы планируют использовать при построении математической модели теории процессов упруго-пластического деформирования для латуни Л63. Также они будут полезны для верификации имеющихся математических моделей пластического деформирования материалов [2–9].

Литература

1. Ильющин 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. Ильющина // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2018. № 5. С. 29–46.
4. Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. New York : Begell House. 2013. 174 p.
5. Темис Ю.М., Худякова А.Д. Модель неизотермического упруго-пластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении // Математическое моделирование и численные методы. 2017. № 3 (15). С. 20–37.
6. Прикладная теория пластичности / Ф.М. Митенков, И.А. Волков, Л.А. Игумнов, А.В. Каплиенко, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов М. : Физматлит, 2015. 284 с.
7. Пелешко В.А. Прикладной и инженерный варианты теории упруго-пластических процессов активного сложного нагружения. Часть 2: Верификация и идентификация // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2016. № 1. С. 111–135.
8. Молодцов И.Н. Прикладные вопросы теории упруго-пластических процессов А.А. Ильющина // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2020. № 5. С. 33–38.
9. Experimental verification of postulat of isotropy and mathematical modeling of elastoplastic deformation processes follow the complex angled nonanalytic trajectories / V.G. Zubchaninov, A.A. Alekseev, E.G. Alekseeva, V.I. Gultiaev // Materials Physics and Mechanics. 2017. Vol. 32, no. 3. P. 298–304.

References

1. Il'yushin A.A. Plastichnost'. Osnovy obshchei matematicheskoi teorii [Plasticity. Fundamentals of general mathematical theory]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 273 p.
2. Zubchaninov V.G. Mekhanika protsessov plasticheskikh sred [Mechanics of the processes in plastic media]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 352 p.
3. Zubchaninov V.G. The general mathematical theory of plasticity and the Il'yushin postulates of macroscopic definability and isotropy // Moscow University Mechanics Bulletin. 2018. Vol. 73, no. 5. P. 101–116. DOI 10.3103/S0027133018050011.
4. Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. New York : Begell House. 2013. 174 p.

-
5. Temis Y.M., Khudyakova A.D. Model' neizotermicheskogo uprugoplasticheskogo deformirovaniia konstruktsionnykh materialov pri sloznom nagruzhении [Model of non-isothermal elastoplastic deformation of structural materials under complex loading]. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical Modeling and Computational Methods]. 2017. No. 3 (15). P. 20–37.
 6. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A., Kaplienko A.V., Korotkikh Iu.G., Panov V.A. *Prikladnaia teoriia plastichnosti* [Applied theory of plasticity]. Moscow: Fizmatlit, 2015. 284 p.
 7. Peleshko V.A. Applied and engineering versions of the theory of elastoplastic processes of active complex loading. Part 2: Identification and verification // *Mechanics of Solids*. 2016. Vol. 51, no. 1. P. 91–113. DOI 10.3103/S0025654416010106.
 8. Molodtsov I.N. Applied questions of Il'yushin theory of elastoplastic processes // *Moscow University Mechanics Bulletin*. 2020. Vol. 75, no. 5. P. 121–126.
 9. Experimental verification of postulat of isotropy and mathematical modeling of elastoplastic deformation processes follow the complex angled nonanalytic trajectories / V.G. Zubchaninov, A.A. Alekseev, E.G. Alekseeva, V.I. Gultiaev // *Materials Physics and Mechanics*. 2017. Vol. 32, no. 3. P. 298–304.

Материалы получены редакцией 21.02.2023