

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.539.43.001.24

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ
СТРУКТУРНО-НЕСТАБИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ**© 2019 г. А. Н. Романов^{1,*}, Н. И. Филимонова¹¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: alrom37@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

Рассмотрены особенности развития деформаций и накопления повреждений в структурно-нестабильном материале – бронзе и выявлено увеличение циклической пластичности твердой (нагартованной) бронзы. Отмечено, что при оценке уровней накопленных повреждений и предельного случая (образование трещины) в структурно-нестабильных материалах необходимо определять степень “размягчения” материала под действием знакопеременных амплитуд упругопластического деформирования.

Ключевые слова: структурно-нестабильный материал, малоцикловое нагружение, накопление повреждений, предельное состояние, бронза

DOI: 10.1134/S0235711919050109

При упругопластическом циклическом деформировании структурно-стабильных металлических материалов накопление повреждений η и предельное состояние описывается деформационно-кинетическим критерием соответственно в виде [1–3]

$$\eta = \int_0^N \frac{\varepsilon_p^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN, \quad (1)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\varepsilon_p^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon$ – накопленная деформация в цикле, ε_p – пластическая деформация, ε – предельная деформация однократного разрушения образца при растяжении и соответствующая моменту потери устойчивости пластической деформации при отрыве (сопротивление отрыву) истинному пределу прочности [1], N и N_p – текущее и разрушающее число циклов.

Зависимости (1)–(2) хорошо описывают процессы повреждения в области малоциклового усталости, преимущественно при квазистатическом разрушении при нагружении с заданной амплитудой нагрузки (мягкое нагружение).

При нагружении с заданным размахом упругопластической деформации (жесткое нагружение) одностороннего накопления деформации не происходит (второй член в (1)–(2) равен нулю), ширина петли гистерезиса практически не изменяется, и тогда зависимость (2) может быть записана в виде

$$\frac{\varepsilon_p^2}{\varepsilon^2} N = 1 \quad \text{или} \quad N_p = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_p^2}. \quad (3)$$

При учете повреждающего влияния упругой деформации с переходом в области многоциклового усталости зависимости (1)–(2) могут быть записаны при мягком нагружении в виде [1, 2]

$$\eta = \int_0^N \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN. \quad (4)$$

В предельном случае (образование трещины)

$$\int_0^{N_p} \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN = 1,$$

при жестком нагружении

$$\frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon^2} N_p = 1, \quad N_p = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}. \quad (5)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\varepsilon_p^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^{N_p} \frac{\varepsilon_p \varepsilon_e}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (6)$$

где ε_e – упругая деформация $\varepsilon_e = \sigma_a/E$, ε_{ep} – упругопластическая деформация в полцикле растяжения: $\varepsilon_{ep} = \varepsilon_p + \varepsilon_e$.

Третий член в зависимости (6) отражает вклад упругой деформации в общее повреждение при циклическом упругопластическом деформировании бронзы.

Как показали экспериментальные исследования, в конструкционных материалах с нестабильной структурой, которая под действием циклической пластической деформации, времени и выделяющегося при этом значительного количества тепла [3], могут происходить структурные изменения (появление и исчезновение новых фаз, релаксация микронапряжений и другие), сопровождающиеся повышением или понижением прочности и пластичности.

Из приведенных в табл. 1 примеров видно, как значительно изменяются свойства бронзы в зависимости от технологической обработки и в связи с этим бронзы разделяются на литые, мягкие и твердые [4].

Последние, как правило, связаны с большими пластическими деформациями при формировании исходных заготовок.

Исследования твердой бронзы экспериментального состава ($\sigma_b = 605$ МПа, $\sigma_{0,2} = 252$ МПа, $\sigma_{\text{пц}} = 175$ МПа, $\delta = 9\%$, кривая усталости представлена на рис. 1а) показали, что при циклическом упругопластическом деформировании образцов диаметром 12 мм при растяжении–сжатии с частотой 5–7 циклов в минуту происходят изменения пластических свойств: увеличение пластичности, и чем больше долговечность, тем выше расчетная пластичность при оценке повреждений по зависимостям (1)–(5).

Определение расчетной пластичности в зависимостях (1)–(6) осуществляется в соответствии с критерием (2)

$$\varepsilon = \varepsilon_p \sqrt{N_p} + \Delta \varepsilon N_p. \quad (7)$$

Результаты расчета по (7) приведены на рис. 1б. Из рис. 1б следует, что при исходной пластичности исследуемой бронзы в 9% при долговечности 35 циклов расчетная ε составляла 16%, при $N_p = 199$ циклов $\varepsilon = 18\%$, а при долговечностях 2024 и 3782 циклов она составляла 24% (рис. 1б).

Таблица 1.

Марка	Механические свойства				
	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	$\sigma_{\text{пл}}$, кг/мм ²	δ , %	ψ , %
Бр. ОФ 6.5-04					
литая	25–35	14	10	15–30	–
мягкая	35–45	20–25	–	60–70	–
твердая	70–80	59–55	45	7.5–12	–
Бр. АЖН 10-4-4					
литая	65	30	27.5	10	12
мягкая	60	–	11.8	35	45
твердая	77	–	30	9	11
прутки	65	–	–	5	–
прессованная					

Такое увеличение пластических свойств (“размягчение”) объясняется прежде всего тем фактом, что при формировании прутка диаметром 50 мм, из которого изготавливались образцы, материал был сильно наклепан (чем и вызвана такая низкая исходная пластичность, не превышающая 9%). В процессе упругопластического деформирования при симметричном цикле растяжения – сжатия снимались наведенные технологической обработкой остаточные напряжения с возникновением новых ориентированных полей остаточных напряжений со сменой их знака в каждом цикле. В бронзах в зависимости от температурно-силовых условий могут протекать многочисленные неустойчивые фазовые превращения [4], влияющие на свойства этих материалов (в том числе и пластические).

Как следует из рис. 2а, испытанная бронза является циклически упрочняющимся материалом, и чтобы разрушить образец в малоцикловой области, так же, как и для алюминиевых сплавов [2], требуется исходное нагружение (нулевой полуцикл), осуществляемый с большими деформациями. Для долговечности 35 циклов исходная де-

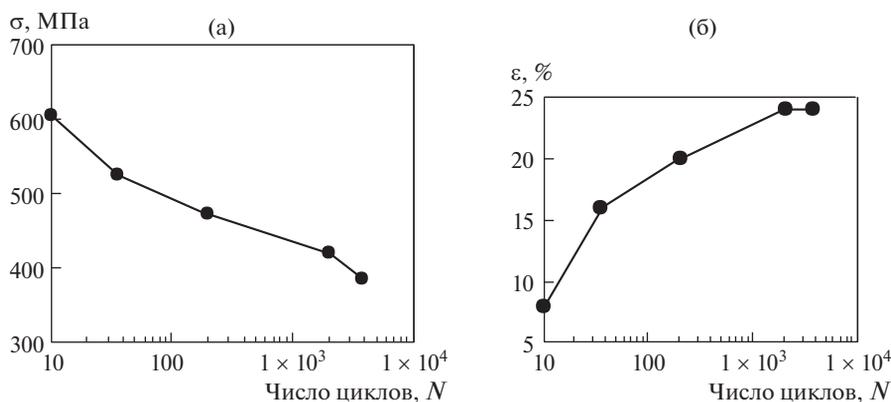


Рис. 1. Кривая малоцикловой усталости бронзы (а) и зависимость расчетной пластичности от долговечности (б).

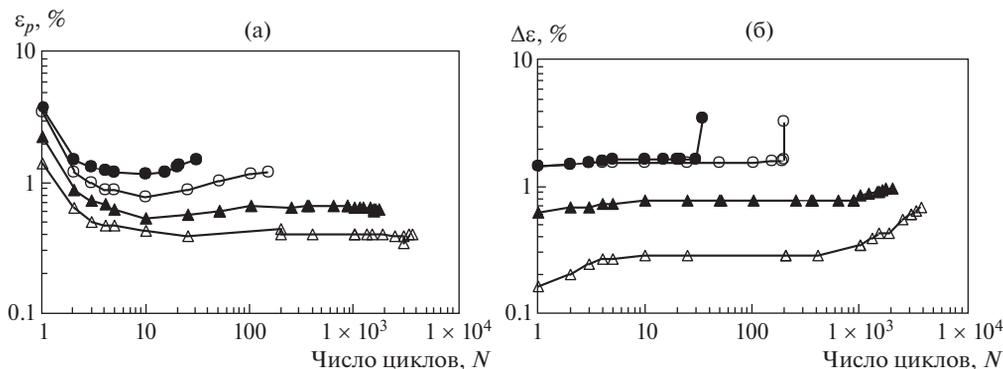


Рис. 2. Кинетика пластической деформации в полуциклах растяжения бронзы (а) и односторонне накопленной деформации (б) в зависимости от числа циклов нагружения.

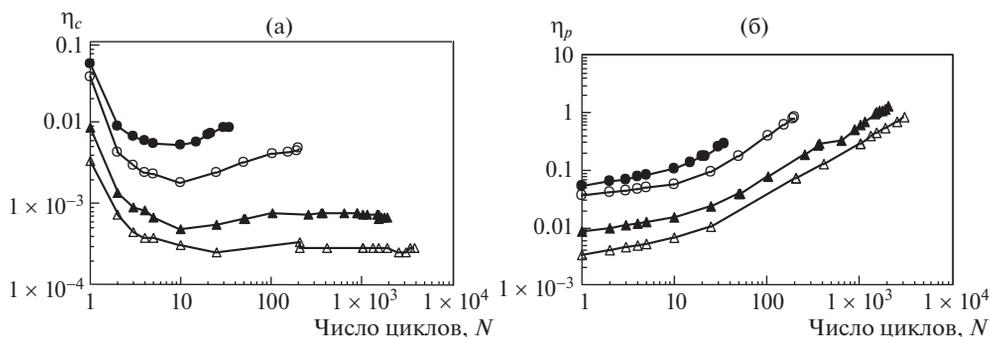


Рис. 3. Зависимость повреждений от пластической деформации в каждом цикле (а) и суммарное с ростом числа циклов нагружения (б).

формация составляла 3.66%, что составляет почти половину от общей исходной пластичности исследуемой бронзы в исходном состоянии. При долговечности в 199 циклов имела место исходная деформация в 3.4%, при $N_p = 2024$ цикла и $N_p = 3782$ цикла она была 2.2% и 1.38% соответственно. Вместе с тем большая (основная) доля долговечностей протекала при деформациях в полуцикле растяжения 1.6% для $N_p = 35$ циклов; 0.9% для $N_p = 199$ циклов, 0.65% ($N_p = 2024$ цикла) и 0.45% ($N_p = 3782$ цикла).

При названных долговечностях первые 10 циклов характеризовались затухающим упрочнением, а после 10 циклов нагружения при малых долговечностях (35 и 199 циклов) наблюдалось разупрочнение вследствие повреждения (увеличение ширины петли гистерезиса с ростом числа циклов нагружения). Для больших долговечностей (2024 и 3782 цикла) имело место стабильное состояние: ширина петли практически не изменялась вплоть до момента окончательного хрупкого разрушения без заметных накопленных деформаций, в том числе и в момент окончательного разрушения (последнего цикла). Причем основное одностороннее накопление остаточных деформаций происходит в первом цикле нагружения (рис. 2б), а последующие циклы не дают прироста остаточной деформации. Вместе с тем, как отмечалось выше, стабилизация ширины

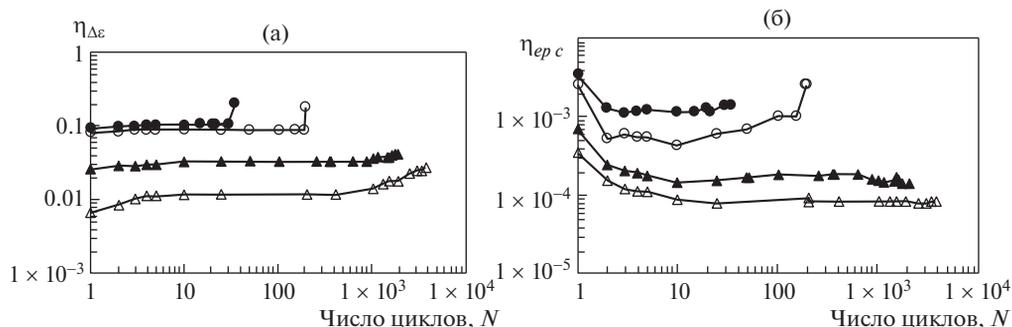


Рис. 4. Повреждение от односторонне накопленной пластической (а) и с участием упругой деформации в каждом цикле (б).

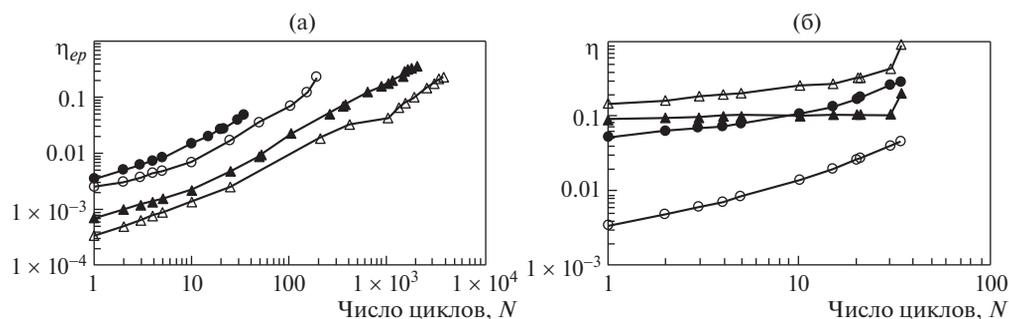


Рис. 5. Суммарно накопленное повреждение от действия упругой деформации от числа циклов до разрушения (а); зависимость доли составляющих повреждений в суммарное при $N = 35$ (б).

петли гистерезиса сопровождается “размягчением” материала, обуславливающим рост пластичности материала (увеличение расчетной ϵ , рис. 16).

Характер изменения пластической деформации в цикле (рис. 2а) определяет и характер накопления повреждений от пластической деформации в цикле (рис. 3а). Накопление повреждений от пластической деформации (первый член в зависимости (2)) в указанном диапазоне долговечностей является преобладающим и достигающим практически единицы (рис. 3б). Повреждение от односторонне накопленных деформаций (второй член в критерии (2)) оказалось значительно меньше (рис. 4а) и составляло для долговечности 35 циклов 0,2, для долговечностей в 199, 2024 и 3782 цикла 0,18; 0,04; 0,028 соответственно.

Влияние упругой составляющей в цикле – третий член в зависимости (6) показано на рис. 4б, а общее накопленное к моменту разрушения – на рис. 5а. Из рис. 5а видно, что в диапазоне малоциклового усталости вклад упругой составляющей деформации невелик, и для приведенных долговечностей находится в интервале от 0,045 ($N_p = 35$ циклов) до 0,2 ($N_p = 3782$ цикла). Вклад каждой из составляющих зависимости (6) представлен на рис. 5б–7а.

Как следует из рис. 5б–7а, для всех режимов нагружения основной повреждающей характеристикой является пластическая деформация в цикле (темные кружки на

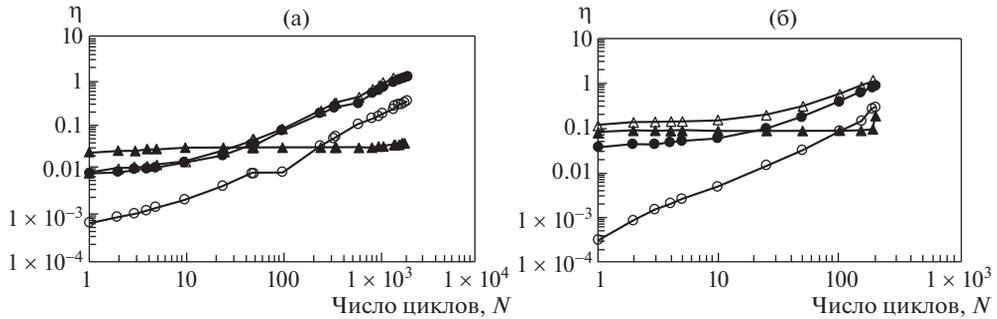


Рис. 6. Составляющие суммарных повреждений для образцов, испытанных при $\sigma_a = 419,4$ МПа (а) и $\sigma_a = 472$ МПа (б) соответственно.

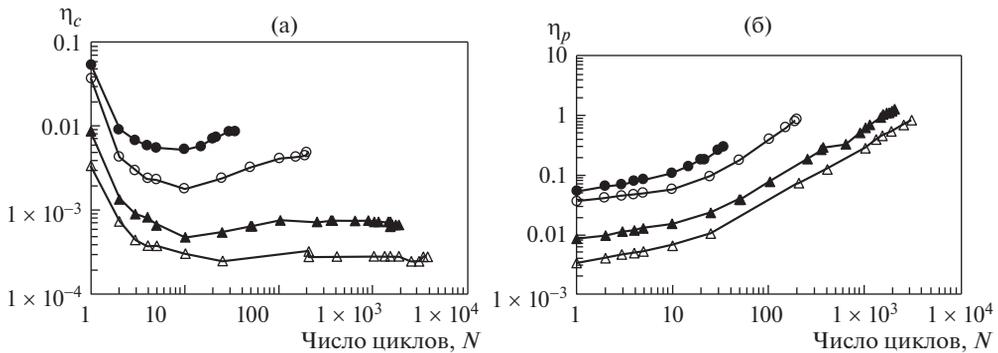


Рис. 7. Зависимость суммарных повреждений в каждом цикле (а); от пластической деформации (б).

рис. 5б–7а), к тому же активизированная увеличением пластичности (“размягчением”).

Односторонне накопленная деформация (темные треугольники) во всех случаях в отличие от черных металлов не является преобладающей при малом числе циклов разрушения.

Роль упругой составляющей в области малых долговечностей невелика и возрастает с увеличением числа циклов до разрушения.

Суммарный вклад всех составляющих для каждого режима нагружения представлен на рис. 7б.

Приведенные критерии развивают критерий [7] на случай мягкого нагружения и на многоцикловую усталость. Таким образом, при оценке уровней накопленных повреждений на заданной стадии нагружения и для описания предельных состояний (образование трещин) в структурно-нестабильных материалах (в данном случае ярким представителем таких материалов является твердая нагартованная бронза) следует считаться с возможностью роста пластичности (“размягчением”) материала под действием циклического упругопластического деформирования.

Наряду с представленным выше критерием накопления повреждений при моделировании процессов повреждения в ряде случаев используются и другие подходы [4–10].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-58-48008 ИНД_оми).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения // Инженерный журнал “Справочник. Приложение”, М. 2007. № 6. С. 35.
2. Нестеренко Г.И., Романов А.Н., Филимонова Н.И. Экспериментальное обоснование единого критерия усталостного разрушения алюминиевого сплава на стадии образования трещин / Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения. Сборник статей. – М. Российская академия наук (“Наука” РАН), 2016. 512 с. ISBN 978-5--9908169-6-1. с. 407.
3. Romanov A.N. Nesterenko G.I., Filimonova N.I. Damage Accumulation under Variable Loading of Cyclically Hardening Material at the Stages of Formation and Development of Cracks // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. V. 47. № 5. P. 414.
4. Сириягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник. Москва: “Металлургия”. 1974.
5. Fu X., Zhang J., Lin J. Study on the fatigue life and damage accumulation of a compressor blade based on a modified nonlinear damage model // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2018. Vol. 41. № 5. P. 1077.
6. Du W., Luo Y., Wang Y., Chen S., Yu D. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of aisi h11 at elevated temperature // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2017. Vol. 40. № 6. P. 994.
7. Xia T., Zou J., Gao D., Yao W. A novel accumulative fatigue damage model for multiaxial step spectrum considering the variations of loading amplitude and loading path // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2016. Vol. 39. № 2. P. 194.
8. Shah M., Rezaei-Aria F., Mabru C. Characterisation of the surface damage of X38CRMOV5 (AISI H11) tool steel at room temperature and 600°C // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2015. Vol. 38. № 6. P. 742.
9. Socha G., Dietrich L. A fatigue damage indicator parameter for p91 chromium-molybdenum alloy steel and fatigue pre-damaged P54T carbon steel // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2014. Vol. 37. № 2. P. 195.
10. Tankasala H.C., Deshpande V.S., Fleck N.A. Notch sensitivity of orthotropic solids: interaction of tensile and shear damage zones // International Journal of Fracture. 2018. Vol. 21. № 2. P. 123.