К построению амплитудной зависимости внутреннего трения при колебаниях пористых металлических композитов

И. К. Архипов¹, В. И. Абрамова¹, А. Е. Гвоздев¹, Е. В. Агеев²✉,
С. Н. Кутепов¹, А. А. Калинин³

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО Тульский государственный университет
пр. Ленина 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Построение амплитудной зависимости декремента продольных и изгибных колебаний образцов пористых металлических композитов, изготовленных по 3D-технологии.

Методы. Основное внимание уделено роли микропластичности в рассеянии энергии колебаний, поскольку величина декремента в композите будет больше, чем в монолитном материале. Учитывается влияние пористости на уровень рассеяния энергии. Использовалась статистическая модель, основанная на результатах теории функционалов, заданных на случайных процессах.

Результаты. Это позволило найти концентрацию микропластических зон в композите при продольных и изгибных колебаниях образца. Величина декремента колебаний определяется как отношение потенциальной энергии пластических деформаций к общей потенциальной энергии всего образца. Для вычисления эффективных модулей в композите применяется известная методика теории упругости микронеоднородных сред. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пористость существенно влияет на концентрацию микропластических зон и рассеяние внутреннего трения при продольных и изгибных колебаниях. Однако следует отметить, что при малых амплитудах микропластические области в окрестностях пор не образуются. Поэтому причины возникновения рассеяния энергии не объясняются только микропластичностью. Источником таких потерь являются дислокационные, ферромагнитные и другие причины. Однако уровень этих потерь значительно меньше, чем указанный в данной работе, и зависит только от частоты колебаний.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения различной природы слитковых, порошковых и композиционных материалов с высокой дисперсностью в фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях.

Ключевые слова: внутреннее трение; металлические композиты; микропластические зоны; напряженно-деформированное состояние.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №11.6682.2017/8.9.

Для цитирования: К построению амплитудной зависимости внутреннего трения при колебаниях пористых металлических композитов / И. К. Архипов, В. И. Абрамова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, С. Н. Кутепов, А. А. Калинин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 37-48. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-37-48>.

Поступила в редакцию 27.02.2020

Подписана в печать 16.03.2020

Опубликована 20.04.2020

To the Construction of the Amplitude Dependence of Internal Friction with Vibrations of Porous Metal Composites

Igor C. Arkhipov ¹, Vlada I. Abramova ¹, Alexander E. Gvozdev ¹,
Evgeny V. Ageev ² ✉, Sergei N. Kutepov ¹, Anton A. Kalinin ³

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

² Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Tula State University
92 Lenin str., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research was to plot the amplitude dependence of the decrement of longitudinal and bending vibrations of samples of porous metal composites manufactured using 3D technology.

Methods. The main attention is paid to the role of microplasticity in the scattering of the vibration energy, since the decrement value in composite will be greater than in monolithic material. The effect of porosity on the level of energy dissipation is taken into account. We have used a statistical model based on the results of the theory of functionals given on random processes.

Results. This made it possible to find the concentration of microplastic zones in the composite during longitudinal and bending vibrations of the sample. The value of the vibration decrement is defined as the ratio of the potential energy of plastic deformations to the total potential energy of the entire sample. To calculate the effective moduli in the composite, the well-known technique of the theory of elasticity of micro-inhomogeneous media is used. The results obtained indicate that porosity significantly affects the concentration of microplastic zones and the scattering of internal friction during longitudinal and bending vibrations. However, it should be noted that at low amplitudes, microplastic regions are not formed in the vicinity of the pores. Therefore, the reasons for the appearance of energy dissipation are not explained only by microplasticity. The source of such losses are dislocation, ferromagnetic and other reasons. However, the level of these losses is much less than that indicated in this work, and depends only on the oscillation frequency.

Conclusion. The results obtained can be used to establish the patterns of behavior of various natures of ingot, powder and composite materials with high dispersion in phase and structural components in various conditions and states.

Keywords: internal friction; metal composites; microplastic zones; stress-strain state.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was prepared as part of the state task of the Ministry of education and science of the Russian Federation No. 11.6682.2017/8.9.

For citation: Arkhipov I. C., Abramova V. I., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Kutepov S.N., Kalinin A. A. To the Construction of the Amplitude Dependence of Internal Friction with Vibrations of Porous Metal Composites // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 37-48 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-37-48>.

Received 27.02.2020

Accepted 16.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

Напряженно-деформированное состояние в пористых композитах обладает свойствами микропластичности. В этом случае в окрестностях пор возникает концентрация напряжений, которые превышают предел текучести материала матрицы.

В матрице при этом появляются микропластические зоны. При колебаниях в этих зонах происходит потеря потенциальной энергии. Поэтому величина декремента в композите будет больше, чем в монолитном материале.

Целью работы является построение амплитудной зависимости декремента продольных и изгибных колебаний образцов пористых металлических композитов, изготовленных по 3D-технологии.

Материалы и методы

Основное внимание уделено роли микропластичности в рассеянии энергии колебаний. Учитывается влияние пористости на уровень рассеяния энергии. Использовалась статистическая модель, основанная на результатах теории функционалов, заданных на случайных процессах.

Результаты и их обсуждение

Для построения расчетной амплитудной зависимости декремента необходимо знать концентрацию микропластических зон в композите. С учетом этой концентрации можно построить кривую нагружения при первом цикле колебаний. Также можно вычислить меру рассеяния энергии в микропластических зонах (на единицу объема).

Концентрация микропластических зон определяется из статистической модели [1] как вероятность превышения интенсивности напряжений $\sigma_i(x)$ над пределом текучести материала σ_s . Используя результаты теории функционалов, заданных на случайных процессах [2], для стационарного и нормального случайного процесса $\sigma_i(x)$ получим соотношение [1]:

$$C_p = C_2 [1 - \Phi(y)], \quad (1)$$

$$\text{где } \Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2)$$

$$y = \frac{\sigma_s - \langle \sigma_i \rangle}{\sqrt{D_{\sigma\sigma}}}. \quad (3)$$

Для вычисления концентрации микропластических зон C_p необходимо знать дисперсию $D_{\sigma\sigma}$ процесса $\sigma_i(x)$, среднее значение $\langle \sigma_i \rangle$ и объемную кон-

центрацию матрицы C_2 . Вычисление дисперсии для пористого металлического композита произведено в работе [1]:

$$D_{\sigma\sigma} = p(1-p) \left(\frac{\mu_2}{\mu_*} \right)^2 \langle \sigma_i \rangle^2 \chi^2, \quad (4)$$

где p – пористость композита; μ_2 – модуль сдвига в матрице; μ_* – эффективный модуль сдвига композита;

$$\chi = \frac{3-4\nu}{5(1-\nu)}; \nu - \text{коэффициент Пуассона}$$

в матрице.

Амплитудная зависимость декремента продольных колебаний определяется в виде формулы [3]:

$$\delta(\sigma_a) = \frac{\Delta W}{2W}, \quad (5)$$

где ΔW – потери удельной энергии формоизменения при пластической деформации; W – общая удельная энергия (в единице объема).

Величина ΔW определяется для идеально-пластического материала в виде [4]:

$$\Delta W = \frac{\sigma_s^2}{2E_2} c_p. \quad (6)$$

При одноосном растяжении величина W определяется по формуле

$$W = \frac{\sigma_a^2}{2E_*}, \quad (7)$$

где σ_a – амплитуда напряжений; E_* – эффективный модуль Юнга композита.

Применяя сингулярное приближение теории случайных функций [5], вычислим E_* по формулам (8)–(11):

$$E_* = \frac{9K_*\mu_*}{3K_* + \mu_*}, \quad (8)$$

$$K_* = (1-p)K_2 - \frac{p(1-p)K_2^2}{pK_2 + a}, \quad (9)$$

$$\mu_* = (1-p)\mu_2 - \frac{p(1-p)\mu_2^2}{p\mu_2 + b}, \quad (10)$$

$$a = \frac{4}{3}(1-p)\mu_2; \quad ,$$

$$b = \frac{1}{6}(1-p) \frac{\mu_2(9K_2 + 8\mu_2)}{K_2 + 2\mu_2}, \quad (11)$$

где K_2 , μ_2 – объемный и сдвиговой модули упругости материала матрицы.

Расчетная амплитудная зависимость декремента $\delta(\sigma_a)$ получена из (6)–(7) с учетом (8)–(11) в виде

$$\delta(\sigma_a) = \frac{1}{2} \frac{\sigma_s^2}{\sigma_a^2} c_p \frac{E_*}{E_2}, \quad (12)$$

где зависимость $c_p(\sigma_a)$ получена из формул (1)–(3) с заменой $\langle \sigma_i \rangle$ на (σ_a) .

Расчет $\delta(\sigma_a)$ по формуле (12) произведем для пористостей $p_1 = 0,3$ и $p_1 = 0,5$ при следующих данных $K_2 = 170$ ГПа, $\mu_2 = 80$ ГПа, $E_2 = 226$ ГПа, $\sigma_s = 400$ ГПа.

График расчетной зависимости $\delta(\sigma_a)$ представлен на рис. 1.

При изгибных колебаниях напряженно-деформированное состояние в образце становится существенно неоднородным. Размеры микропластических зон будут зависеть от координат. Случайный процесс σ_i будет случайным полем $\sigma_i(x, y, z)$, которое будет нестационарным. Алгоритм вычисления c_p , предложенный для продольных колебаний, будет непригоден. Поэтому предлагается следующая модель вычисления концентрации микропластических зон (рис. 1):

1. Производится преобразование переменной $\sigma_i(x, y)$ по формулам:

$$Y = \frac{\sigma_i(x, y)}{x}, \quad (13)$$

где $\sigma_i(x, y)$ определяется из [4]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad (14)$$

$$\sigma_x = \frac{P_{xy}}{J}, \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P(h^2 - 4y^2)}{8J}, \quad (16)$$

где P – нагрузка при первом цикле нагружения, H, J – момент инерции поперечного сечения, м^4 ; $J = \frac{bh^3}{12}$; b – ширина; h – высота образца.

Рис. 1. Расчетная амплитудная зависимость внутреннего трения при продольных колебаниях образца пористого композита с различными пористостями

Fig. 1. Calculated amplitude dependence of internal friction for longitudinal vibrations of a sample of a porous composite with different porosities

Величина σ_i меняется во времени от 0 до σ_a – амплитуды интенсивности напряжений. Максимальное значение σ_i достигается в заделке консоли, т. е. при $x = l, y = h/2$. Это значение равно:

$$\sigma_{\max} = \frac{Phl}{2I}. \quad (17)$$

При $y = h/2$ преобразованная переменная Y из (13) имеет вид:

$$Y = \frac{\sigma_{\max}}{l}(1 + \varphi(x)), \quad (18)$$

где $\varphi(x)$ – стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией $D_{\varphi\varphi}$. На основании центральной предельной теоремы [6] можно утверждать при большом количестве пор, что этот процесс гауссовский. Таким образом:

$$\langle Y \rangle = \frac{\sigma_{\max}}{l}, \quad (19)$$

$$D_{yy} = \left(\frac{\sigma_{\max}}{l} \right)^2 D_{\phi\phi}. \quad (20)$$

2. Вероятность превышения случайного процесса Y над уровнем σ_s/l определяется при $y = h/2$ по методике [1]:

$$c_{p1} = c_2 \left(1 - \frac{\Phi(z)}{\sqrt{D_{\phi\phi}}} \right), \quad (21)$$

где $c_2 = 1 - p$, $z = (\sigma_s / \sigma_{\max}) - 1$,

$$\sqrt{D_{\phi\phi}} = \sqrt{p(1-p)} \frac{\mu_*}{2\mu_2}, \quad (22)$$

где p – пористость в образце композита; μ_* – эффективный модуль сдвига композита; μ_2 – модуль сдвига в матрице.

Эффективный модуль сдвига μ_* в зависимости от пористости определен в работе [5].

3. Произведем послойное разделение объема консоли по высоте. При этом в каждом слое при $y_i = \frac{h}{2} - i\Delta h_i$

произведем аналогичные вычисления для c_{pi} ($i = 1, 2, 3 \dots n$). Если пределы при растяжении и сжатии материала консоли одинаковы, то концентрации микропластических зон в растянутой и сжатой части консоли определяются одинаково. Величина c_p во всем образце определяется тогда по формуле

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^n c_{pi} V_i}{V}, \quad (23)$$

где V_i – объем i -го слоя; V – объем образца, $V = bhl$.

Расчет по формуле (23) производится при различных отношениях σ_s / σ_a . Результаты расчета приведены в табл. 1.

Расчет амплитудной зависимости декремента при изгибных колебаниях произведем по формуле (12). Результаты расчета для двух пористостей $p = 0,3$ и $p = 0,5$ приведены в табл. 2.

Таблица 1. Зависимость концентрации микропластических зон от амплитуды напряжений при консольном изгибе и пористости композита

Table 1. The dependence of the concentration of microplastic zones on the stress amplitude at the cantilever bend and the porosity of the composite

σ_s / σ_a	3	2	1,5	1,3
$c_p, p = 0,3$	0,0009	0,007	0,042	0,117
$c_p, p = 0,5$	0,008	0,015	0,085	0,148

Таблица 2. Амплитудная зависимость декремента изгибных колебаний консольного образца

Table 2. Amplitude dependence of the Flexural vibration decrement of the cantilever sample

σ_s / σ_a	3	2	1,5	1,3
$\delta(\sigma_a), p = 0,3$	0,0022	0,0084	0,028	0,059
$\delta(\sigma_a), p = 0,5$	0,009	0,015	0,047	0,063

Из табл. 1 и 2, а также из рис.1 следует, что пористость существенно влияет на концентрацию микропластических зон и рассеяние внутреннего трения при продольных и изгибных колебаниях. Однако следует отметить, что при малых амплитудах $\sigma_a < \frac{\sigma_s}{3}$ микропластические области в окрестностях пор не образуются [4]. Поэтому причины возникновения рассеяния энергии не объясняются только микропластичностью. Источником таких потерь являются дислокационные, ферромагнитные и

другие причины [7-23]. Однако уровень этих потерь значительно меньше, чем указанный в данной работе, и зависит только от частоты колебаний.

Выводы

Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения различной природы слитковых, порошковых и композиционных материалов с высокой дисперсностью в фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях.

Список литературы

1. Архипов И.К., Толоконников Л.А. Эффективные соотношения между напряжениями и деформациями в корреляционной теории упругопластических деформаций // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1984. Т. 2. С. 196-200.
2. Хусу А.П. О некоторых встречающихся в технике функционалах, заданных на процессах // Вестник ЛГУ. 1956. Т. 1. № 1. С. 88-100.
3. Архипов И.К., Головин С.А., Петрушин Г.Д. К оценке рассеяния энергии в композиционных материалах // Проблемы прочности. 1984. № 8. С. 94-96.
4. Безухов Н.И. Основы упругости, пластичности и ползучести. М: Высшая школа, 1968. 512 с.
5. Шермергор Т.Д. Теория упругости микрон неоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
6. Чистяков В.П. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1978. 224 с.
7. Головин С.А. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 190 с.
8. Архипов И.К., Абрамова В.И. Определение концентрации микропластических зон в композите по амплитудной зависимости декремента колебаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 490-493.
9. Гвоздев А.Е. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах: монография. 2 изд., испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 476 с.

10. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и оп. Тула: Издательство ТулГУ, 2015. 337 с.

11. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on ShKh15 steel / A.D. Breki, S.E. Aleksandrov, K.S. Tyurikov, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, A.A. Kalinin // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Т. 9. № 4. С. 714-718.

12. Влияние качества шихты на чувствительность стали 30ХГСА к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 37-48.

13. Влияние качества шихты и температуры отжига на формирование зеренной структуры аустенита в стали 30ХГСА / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 2. С. 8-26.

14. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 235 с.

15. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

16. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. II (обзор) / Сергеев Н.Н., А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 4. С. 20-29.

17. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2017. № 12. С. 18-25.

18. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

19. Влияние разнотермичности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

20. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

21. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

22. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

23. Длительная прочность арматурной стали 22Х2Г2АЮ при испытаниях на коррозионное растрескивание в кипящем растворе нитратов / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Н. Сергеев, А. Г Колмаков, В.В. Извольский, А.Е. Гвоздев // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 8. С. 33-39.

References

1. Arkhipov I. K., Tolokonnikov L. A. Effektivnye sootnosheniya mezhdu napryazheniyami i deformatsiyami v korrelyatsionnoi teorii uprugoplasticheskikh deformatsii [Effective relations between stresses and deformations in the correlation theory of elastic-plastic deformations]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Solid Mechanics*, 1984, vol. 2, pp. 196-200 (In Russ.).

2. Khusu A. P. O nekotorykh vstrechayushchikhsya v tekhnike funktsionalakh, zadannykh na protsessakh [On some functionals found in technology, specified on processes]. *Vestnik LGU. = Bulletin of LSU*, 1956, vol. 1, no. 1, pp. 88-100 (In Russ.).

3. Arkhipov I. K., Golovin S. A., Petrushin G. D. K otsenke rasseyaniya energii v kompozitsionnykh materialakh [Estimation of energy scattering in composite materials]. *Problemy prochnosti = Problems of Strength*, 1984, no. 8, pp. 94-96 (In Russ.).

4. Bezukhov N. I. *Osnovy uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of elasticity, plasticity and creep]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968, 512 p. (In Russ.).

5. Shermergor T. D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of micro-homogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 399 p. (In Russ.).

6. Chistyakov V. P. *Kurs teorii veroyatnostei* [Course of probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 224 p. (In Russ.).

7. Golovin S. A. *Uprugie i dempfiruyushchie svoystva konstruktsionnykh metallicheskh materialov* [Elastic and damping properties of structural metal materials]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1987, 190 p. (In Russ.).

8. Arkhipov I. K., Abramova V. I. Opredelenie kontsentratsii mikroplasticheskikh zon v kompozite po amplitudnoi zavisimosti dekrementa kolebaniy [Determination of the concentration of microplastic zones in a composite by the amplitude dependence of the oscillation decrement]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya of the Tula State University. Technical Science*, 2019, is. 3, pp. 490-493 (In Russ.).

9. Gvozdev A. E. *Ekstremal'nye efekty prochnosti i plastichnosti v metallicheskih vysokolegirovannykh slitkovykh i poroshkovykh sistemakh* [Extreme effects of strength and plasticity in metal high-alloy ingot and powder systems]. Tula, 2019, 476 p. (In Russ.).

10. Makarov E. S., Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M. *Teoriya plastichnosti dilatiruyushchikh sred* [Theory of plasticity of dilating media]. Tula, 2015. 337 p. (In Russ.).

11. Breki A.D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K. S., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Kalinin A. A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on ShKh15 steel. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, no.4, pp. 714-718.

12. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementiev D. S. Vliyanie kachestva shikhty na chuvstvitel'nost' stali 30KhGSA k vodorodnomu rastreskivaniyu [Influence of charge quality on the sensitivity of 30KhGSA steel to hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 37-48 (In Russ.).

13. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Minaev I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementiev D. S. Vliyanie kachestva shikhty i temperatury otzhiga na formirovanie zerennoi struktury austenita v stali 30KhGSA [Influence of the charge quality and annealing temperature on the formation of the grain structure of austenite in 30KhGSA steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 8-26 (In Russ.).

14. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A.D., Sergeev N. N., Kuzovleva O. V., Starikov N. E., Maliy D. V. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016, 235 p. (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Part I (review). *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

16. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i spлавov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Part II (review). *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

17. Sergeev N. N., Tereshin V. A., Chukanov A. N., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A., Sergeev A. N., Leontiev I. M., Honelidze D. M., Gvozdev A. E. Formirovanie plasticheskikh zon okolo sfericheskoi polosti v uprochnennykh nizkouglerodistykh stalyakh v usloviyakh vodorodnoi stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

18. Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M., Kolmakov A. G. Formirovanie mekhanicheskikh svoystv uglerodistykh stalei v protsessakh vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Metal Technology*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

19. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Influence of different-grained austenite on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

20. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov vtorogo roda [The Role of the germ formation process in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

21. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

22. Gvozdev A. E., Sergeyev N. N., Minayev I. V., Tikhonova I. V., Sergeyev A. N., Khonelidze D. M., D Maliy. V., Golyshev I. V., Kolmakov A. G., Provotorov D. A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

23. Sergeev N. N., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Kolmakov A. G., Izvolsky V. V., Gvozdev A. E. Dlitel'naya prochnost' armaturnoi stali 22Kh2G2AYu pri ispytaniyakh na korrozionnoe rastreskivanie v kipyashchem rastvore nitratoov [Long-term strength of reinforcement steel 22X2G2A in tests for corrosion cracking in a boiling solution of nitrates]. *Deformatsiya i razrushenie materialov. = Deformation and Destruction of Materials*, 2019, no. 8, pp. 33-39 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Архипов Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: iarh@list.ru

Igor C. Arkhipov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Leading Researcher of the Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: iarh@list.ru

Абрамова Влада Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: abramova_vi@mail.ru

V.I. Abramova, Cand of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of technology and service, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: abramova_vi@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Антон Алексеевич Калинин, инженер, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Российская Федерация, e-mail: antony-ak@mail.ru

Anton A. Kalinin, Engineer, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: antony-ak@mail.ru