

## ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 1.

УДК 539.3

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-370-377

**Математический вариационный метод определения эффективного предела текучести двухкомпонентных композиционных материалов**

И. К. Архипов, В. И. Абрамова, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев

**Игорь Константинович Архипов** — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

**Влада Игоревна Абрамова** — кандидат технических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: abramova\_vi@mail.ru*

**Ольга Владимировна Кузовлева** — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

*e-mail: kusovleva@yandex.ru*

**Александр Евгеньевич Гвоздев** — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru*

**Аннотация**

В работе предлагается развитие математического вариационного метода Хашина-Штрикмана, который применялся ранее для определения вилки возможных значений эффективных упругих характеристик. В этом случае определяются эффективные характеристики пластичности двухкомпонентных композитов. В частности, определена вилка возможных значений эффективного предела текучести таких композиционных материалов.

*Ключевые слова:* вариационный метод, композиционные материалы, характеристики пластичности.

*Библиография:* 29 названий.

**Для цитирования:**

И. К. Архипов, В. И. Абрамова, О. В. Кузовлева, А. Е. Гвоздев. Математический вариационный метод определения эффективного предела текучести двухкомпонентных композиционных материалов // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 1, с. 370–377.

## CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 1.

---

UDC 539.3

DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-370-377

### Mathematical variational method for determining the effective yield strength of two-component composite materials

I. K. Arkhipov, V. I. Abramova, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev

**Igor Konstantinovich Arkhipov** — doctor of technical sciences, professor, Tula State Pedagogical University L. N. Tolstoy (Tula).

**Vlada Igorevna Abramova** — candidate of technical sciences, associate professor, Tula State Pedagogical University L. N. Tolstoy (Tula).

*e-mail: abramova\_vi@mail.ru*

**Olga Vladimirovna Kuzovleva** — candidate of technical sciences, docent, Russian State University of justice (Moscow).

*e-mail: kusovleva@yandex.ru*

**Alexandr Evgenyevich Gvozdev** — doctor of engineering, professor, Tula State Pedagogical University L.N. Tolstoy (Tula).

*e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru*

#### Abstract

The paper proposes the development of the mathematical variational Hashin-Strickman method, which was previously used to determine the maximum possible values of effective elastic characteristics. In this case, the effective plasticity characteristics of two-component composites are determined. In particular, the fork of possible values of the effective yield strength of such composite materials is determined.

*Keywords:* variational method, composite materials, plasticity characteristics.

*Bibliography:* 29 titles.

#### For citation:

I. K. Arkhipov, V. I. Abramova, O. V. Kuzovleva, A. E. Gvozdev, 2021, "Mathematical variational method for determining the effective yield strength of two-component composite materials", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 1, pp. 370–377.

## 1. Введение

Вариационный метод Хашина-Штрикмана [1, 2] основан на поиске стационарных значений функционалов, представляющих потенциальную и дополнительную энергию деформации упругого тела. С помощью этого метода найдена вилка возможных значений эффективных модулей упругости микронеоднородных материалов.

## 2. Основная часть

В частности, для двухкомпонентных композитов получены формулы:

а) для эффективного объемного модуля  $K_*$ :

$$K_2 + \frac{c_1(K_1 - K_2)}{1 + c_2 a_2(K_1 - K_2)} \leq K_* \leq K_1 + \frac{c_2(K_2 - K_1)}{1 + c_1 a_1(K_2 - K_1)}, \quad (1)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{3}{3K_1 + 4\mu_1}; \quad a_2 = \frac{3}{3K_2 + 4\mu_2};$$

$K_1, K_2$  — объемные упругие модули компонентов,  $\mu_1, \mu_2$  — модули сдвига компонентов,  $c_1, c_2$  — объемные концентрации компонентов.

б) для эффективного модуля сдвига  $\mu_*$ :

$$\mu_2 + \frac{c_1(\mu_1 - \mu_2)}{1 + c_2 b_2(\mu_1 - \mu_2)} \leq \mu_* \leq \mu_1 + \frac{c_2(\mu_2 - \mu_1)}{1 + c_1 b_1(\mu_2 - \mu_1)}, \quad (2)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{6(K_1 + 2\mu_1)}{5\mu_1(3K_1 + 4\mu_1)}; \quad b_2 = \frac{6(K_2 + 2\mu_2)}{5\mu_2(3K_2 + 4\mu_2)}.$$

В работе [3] получена зависимость между упругими характеристиками композитов и эффективным пределом текучести  $\sigma_s^*$  в виде:

$$\sigma_s^* = \frac{\mu_*}{\mu_2} \varepsilon \sigma_{s2}. \quad (3)$$

В работе [3] доказано, что эффективная начальная поверхность текучести Генки-Мизеса для двухкомпонентного композита подобна такой же поверхности в однородной матрице с коэффициентом подобия  $\varepsilon$ , который определяется цепочкой формул:

$$\varepsilon = \frac{1 + c_1 D_2 + c_2 D_1}{1 + D_1} \quad (4)$$

$$D_1 = 4g_{\nu 1} \mu_1; \quad D_2 = 4g_{\nu 1} \mu_2 \quad (5)$$

$$g_{\nu 1}^{(s)} = \frac{g_{11}^{(s)} - g_{12}^{(s)}}{4}$$

$$g_{11}^{(s)} = -\frac{2\lambda_s + 7\mu_s}{15\mu_s(\lambda_s + 2\mu_s)}; \quad g_{12}^{(s)} = \frac{\lambda_s + \mu_s}{15\mu_s(\lambda_s + 2\mu_s)}; \quad s = 1; 2 \quad (6)$$

При выводе формулы (3) в работе [3] использовался упруго-пластический вариант метода обобщенного сингулярного приближения [4], когда для вычисления коэффициента подобия  $\varepsilon$  необходимо знать упругие модули тела сравнения [4]  $\lambda$  и  $\mu$ . При использовании метода Хашина–Штрикмана в работе [4] рекомендовано последовательно вычислять для левого (меньшего) предела в формулах (1) и (2) значения этих модулей для менее жесткого компонента, для правого (большого) предела — значения модулей для более жесткого компонента.

Таким образом, для каждого из пределов неравенств (1) и (2) должно быть вычислено в соответствии с (4)-(6), то или иное значение коэффициента подобия  $\varepsilon$ .

Для меньшего значения вилки (1)-(2) в формулах (6) принимается значение  $s = 1$ . Для большего значения вилки в (6) принимается значение  $s = 2$ . Формула для определения вилки значений эффективного предела текучести композита  $\sigma_{s1}^*$  имеет вид:

$$\sigma_{s1}^* \leq \sigma_s^* \leq \sigma_{s2}^*, \quad (7)$$

где

$$\sigma_{s1}^* = \frac{\mu_*^{(1)}}{\mu_2} \varepsilon_1 \sigma_{s2}; \quad \sigma_{s2}^* = \frac{\mu_*^{(2)}}{\mu_2} \varepsilon_2 \sigma_{s1}. \quad (8)$$

$$\mu_*^{(1)} = \mu_2 + \frac{c_1(\mu_1 - \mu_2)}{1 + c_1 b_2(\mu_1 - \mu_2)}; \quad \mu_*^{(2)} = \mu_1 + \frac{c_2(\mu_2 - \mu_1)}{1 + c_1 b_1(\mu_2 - \mu_1)}.$$

Численный расчет  $\sigma_s^*$  проведен для двухкомпонентного композита с матрицей из порошка стали 07X18H12M2 с пропиткой медными включениями. Значения упругих модулей матрицы взяты из [5]. Для включений эти значения соответствуют [6]. Объемные концентрации матрицы и включений:  $c_1 = 0,152$ ,  $c_2 = 0,848$ . Величины  $\mu_1 = 27,7$  ГПа,  $\mu_2 = 80$  ГПа,  $\lambda_1 = 51,4$  ГПа,  $\lambda_2 = 120$  ГПа,  $\varepsilon_1 = 0,967$ ,  $\varepsilon_2 = 1,01$ . В итоге получена вилка возможных значений эффективного предела текучести композита в виде:  $0,858\sigma_{s2} \leq \sigma_s^* \leq 0,869\sigma_{s2}$  где  $\sigma_{s2}$  — предел текучести однородной матрицы.

### 3. Заключение

Полученные результаты могут быть использованы для создания ресурсосберегающих технологий обработки слитковых, порошковых и композиционных металлических систем с учетом рекомендаций автором работ [7]-[29].

### СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hashin Z. 1964, «Theory of mechanical behavior of heterogeneous media», Appl. Mech. Rev., 17, №1.
2. Hashin Z., Shtrikman S. 1962, «On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity», J. Mech. Phys. Solids, 10, №4, p.335.
3. Архипов И. К. 1995, «Характеристики свойств упругости и пластичности композиционных материалов», Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Тула, 218 с.
4. Шермергор Т. Д. 1977. Теория упругости микронеоднородных сред. Москва, Наука, 399 с.
5. Зубченко А. С. 2003. Марочник сталей и сплавов. Москва, Машиностроение, 715 с.
6. Штанов Е. Н., Штанова И. А. 2001. Цветные металлы и сплавы. Справочник. Н. Новгшород, Вента-2, 277 с.
7. Gvozdev A. E., Golyshev I. V., Minayev I. V., Sergeev A. N., Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Khonelidze D. M., Kolmakov A. G. 2015, «Multiparametric optimization of lasercutt in gofsteel sheets», InorganikeMaterials: AppliedResearch, vol.6, No.1, pp. 305-310.
8. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V. 2015, «Role of nucleation in the development of first-order phase transformations», Inorganic Materials: Applied Research, vol.6, №4, pp. 283-288.
9. Патент на изобретение 2014135667/02 (2590045) Российская Федерация / Способ получения металлического порошка из отходов быстрорежущей стали в керосине // Е. В. Агеев, Е. А. Воробьев, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеева. Заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет. №2014135667/02, опубл. 10.07.2016. Бюл. №19.
10. Патент на изобретение 2014135539 (2597445) Российская Федерация / Способ получения нанопорошка меди из отходов // Е. В. Агеев, Н. М. Хорьякова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеева, В. С. Малюхов. Заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет. №2014135539/02, опубл. 10.09.2016. Бюл. №25.

11. Патент на изобретение 2014135563 (2599476) Российская Федерация / Способ получения медного порошка из отходов // Е. В. Агеев, Е. В. Агеева, Н. М. Хорьякова, А. Е. Гвоздев. Заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет. №2014135563, опубл. 10.10.2016.
12. Бреки А. Д., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г. 2016, «Использование обобщенного треугольника Паскаля для описания колебаний силы трения материалов», Материаловедение, №11, С. 3–8.
13. Шоршоров М. Х., Гвоздев А. Е., Афанаскин А. В., Гвоздев Е. А. 2002, «Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве», Металловедение и термическая обработка металлов, №6, С. 12–16.
14. Шоршоров М. Х., Гвоздев А. Е. 2004, «О механизмах и кинетике процессов аккомодации зерен при сверхпластической деформации металлических сплавов в условиях одноосного растяжения», Материаловедение, №7 (88), С. 13–17.
15. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V. 2015, «Role of nucleation in the development of first-order phase transformations», Inorganic Materials: Applied Research, vol.6, №4, pp. 283–288.
16. Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г., Кузовлева О. В., Сергеев Н. Н., Тихонова И. В. 2013, «Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии», Деформация и разрушение материалов, №11, С. 39–43.
17. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Bogolyubova D. N., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. 2015, «Features of Softening Processes of Aluminum, Copper, and Their Alloys under Hot Deformation», Inorganic Materials: Applied Research, vol.6, No.1, pp. 32–40.
18. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. 2015, «Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low and medium carbon low alloy steels», Inorganic Materials: Applied Research, vol.6, No.1, pp. 41–44.
19. Журавлев Г. М., Гвоздев А. Е., Сергеев Н. Н., Провоторов Д. А. 2016, «Вариант расчета максимального упрочнения малоуглеродистых сталей в процессах пластической деформации», Производство проката, №7, С. 9–13.
20. Гвоздев А. Е., Журавлев Г. М., Колмаков А. Г., Сергеев Н. Н. 2016, «Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий», Технология металлов, №1, С. 23–32.
21. Breki A. D., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Didenko A. L., Kudryavtsev V. V., Kolmakov A. G., Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Starikov N. E., Provotorov D. A., Fadin Y. A. 2016, «Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DAD PE polyimide matrix and fillers of tungsten carbide nanoparticle upon dry sliding friction», Inorganic Materials: Applied Research, T.7, №4, pp. 542–546.
22. Журавлев Г. М., Гвоздев А. Е. 2016. Обработка сталей и сплавов в интервале температур фазовых превращений. Тула, Издательство ТулГУ, 320 с.
23. Кузовлева О. В., Гвоздев А. Е., Тихонова И. В., Сергеев Н. Н., Бреки А. Д., Стариков Н. Е., Сергеев А. Н., Калинин А. А., Малий Д. В., Титова Ю. Е., Александров С. Е., Крылов Н. А.

2016. О состоянии предпревращения металлов и сплавов, Тула: Издательство ТулГУ, 245 с.
24. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. 2017, «Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS<sub>2</sub> nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics», *Inorganic Materials: Applied Research*, Т.8. №1. pp. 56–59.
25. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2017, «Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces», *Inorganic Materials: Applied Research*, Т.8, №4, С. 509–514.
26. Гвоздев А. Е. 2019. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах. 2-е изд., испр. и доп. Тула: Издательство ТулГУ, 476 с.
27. Гвоздев А. Е., Сергеев Н. Н., Стариков Н. Е., Сапожников С. В., Кутепов С. Н., Маляров А. В., Калинин А. А. 2019. Малоотходные технологии получения инструмента из горячекатаных, порошковых и литых заготовок быстрорежущих сталей 2-е изд., испр. и доп. Под ред. проф. Н.Н. Сергеева. Тула, Издательство ТулГУ, 282 с.
28. Минаев И. В., Тихонова И. В., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г., Архипова Е. А. 2020, «Формирование поверхности реза и поверхностное упрочнение при лазерной резке звездочкой для цепей из сталей Ст.3 и 30ХГСА», *Деформация и разрушение материалов*, №9, С. 16–21.
29. Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev A.N., Kutevov S.N., Malii D.V., 2020, «Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality», *Inorganic Materials: Applied Research*, v.11, №4, pp. 815–822.

## REFERENCES

1. Hashin Z. 1964, «Theory of mechanical behavior of heterogeneous media», *Appl. Mech. Rev.*, 17, №1.
2. Hashin Z., Shtrikman S. 1962, «On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity», *J. Mech. Phys. Solids*, 10, №4, p.335.
3. Arkhipov I.K. 1995, «Characteristics of the properties of elasticity and plasticity of composite materials», Dissertation for the degree of doctor of technical Sciences. Tula, 218 p.
4. Shermergor T.D. 1977, *Theory of elasticity of micro-homogeneous media*. Moscow. Nauka, 399 pp.
5. Zubchenko A.S. 2003. *Vintage of steels and alloys*. Moscow, Mashinostroenie, 715 p.
6. Shtanov E.N., Shtanova I.A. 2001. *Non-ferrous metals and alloys*. Directory. N. Novgorod, Venta-2, 277 p.
7. Gvozdev A.E., Golyshev I.V., Minayev I.V., Sergeyev A.N., Sergeyev N.N., Tikhonova I.V., Khonelidze D.M., Kolmakov A.G. 2015, «Multiparametric optimization of lasercutt in gofsteel sheets», *InorganikcMaterials: AppliedResearch*, vol.6, No.1, pp. 305–310.

8. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V. 2015, «Role of nucleation in the development of first-order phase transformations», *Inorganic Materials: Applied Research*, vol.6, №4, pp. 283–288.
9. The patent for the invention 2014135667/02 (2590045) Russian Federation / Method for obtaining metal powder from high-speed steel waste in kerosene // E. V. Ageev, E. A. Vorobyov, A. E. Gvozdev, E. V. Ageeva. Applicant and patent holder: Southwestern state University. No. 2014135667/02, publ. 10.07.2016. Byul. no. 19.
10. The patent for the invention 2014135539 (2597445) Russian Federation / Method for obtaining copper nanopowder from waste // E. V. Ageev, N. M. Horyakova, A. E. Gvozdev, E. V. Ageeva, V. S. Malyukhov. Applicant and patent holder: Southwestern state University. No. 2014135539/02, publ. 10.09.2016. Byul. 25.
11. The patent for invention 2014135563 (2599476) Russian Federation / Method of obtaining copper powder from the waste // E.V. Ageev, E.V. Ageeva, N.M. Horakova, A.E. Gvozdev. Applicant and patent holder: Southwestern state University. No. 2014135563, publ. 10.10.2016.
12. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2016, «Using the generalized Pascal triangle to describe vibrations of the friction force of materials», *Materials science*, No.11, pp. 3–8.
13. Shorshorov M.H., Gvozdev A.E., Afanaskin A.V., Gvozdev E.A. 2002, «The calculation of the cluster structure of the melt, its impact on education anamorph solid phases and their structural relaxation upon subsequent *heating*», *The Metallography and heat treatment of metals*, No. 6, pp. 12–16.
14. Shorshorov M.Kh., Gvozdev A.E. 2004, «On mechanisms and kinetics of grain accommodation processes under superplastic deformation of metal alloys under uniaxial tension», *Materials Science*, No. 7 (88), pp. 13–17.
15. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V. 2015, «Role of nucleation in the development of first-order phase transformations», *Inorganic Materials: Applied Research*, vol.6, №4, pp. 283–288.
16. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Kuzovleva O.V., Sergeev N.N., Tikhonova I.V. 2013, «Mechanical properties of structural and tool steels in the state of pre-rotation under thermomechanical action», *Deformation and destruction of materials*, No.11, pp. 39–43.
17. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Bogolyubova D.N., Sergeev N.N., Tikhonova I.V. 2015, «Features of Softening Processes of Aluminum, Copper, and Their Alloys under Hot Deformation», *Inorganic Materials: Applied Research*, vol.6, No.1, pp. 32–40.
18. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Minaev I.V., Sergeev N.N., Tikhonova I.V. 2015, «Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low and medium carbon low alloy steels», *Inorganic Materials: Applied Research*, vol.6, No.1, pp. 41–44.
19. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A. 2016, «The calculation of maximum hardening of low carbon steels in plastic deformation processes», *Production of rolled*, No.7, pp. 9–13.
20. Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M., Kolmakov A.G., Sergeev N.N. 2016, «Calculation of strain damage in the process of reverse extrusion of metal products», *Technology of metals*, No.1, pp. 23–32.

21. Breki A.D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Fadin Y.A. 2016, «Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DAD PE polyimide matrix and fillers of tung stendich alcogenide nanoparticle supon dry sliding friction», *Inorganic Materials: Applied Research*, T.7, №4, pp. 542–546.
22. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E. 2016. *Processing of steels and alloys in the temperature range of phase transformations*. Tula, Tula state University Publishing house, 320 p.
23. Kuzovleva O.V., Gvozdev A.E., Tikhonova I.V., Sergeev N.N., Breki A.D., Starikov N.E., Sergeev A.N., Kalinin A.A., Malii D.V., Titova Yu.E., Aleksandrov S.E., Krylov N.A. 2016. *On the state of pre-conversion of metals and alloys*. Tula: Tulsu Publishing house, 245 p.
24. Breki, A.D., Didenko, A.L., Kudryavtsev, V.V., Vasilyeva, E.S., Tolochko, O.V., Gvozdev, A.E., Sergeev, N.N., Provotorov, D.A., Starikov, N.E., Fadin, Yu.A., Kolmakov, A.G. 2017, «Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS2 nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics», *Inorganic Materials: Applied Research*, T.8. №1. pp. 56–59.
25. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2017, «Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces», *Inorganic Materials: Applied Research*, T.8, №4, С. 509–514.
26. Gvozdev A. E. 2019. *Extreme strength and ductility effects in high-alloy metal ingot and powder systems*. 2nd ed., ISPR. and add. Tula: Publishing house of Tula state University, 476 p.
27. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Starikov N.E., Sapozhnikov S.V., Kutepov S.N., Malyarov A.V., Kalinin A.A. 2019. *Low-waste technologies for obtaining tools from hot-rolled, powder and cast billets of high-speed steels* 2nd ed., ISPR. and add. Edited by Prof. N.N. Sergeev. Tula, Tula state University Publishing house, 282 p.
28. Minaev I.V., Tikhonova I.V., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Arkhipova E.A. 2020, «Formation of the cutting surface and surface hardening during laser cutting with an asterisk for chains made of St.3 and 30KHGSA steels», *Deformation and destruction of materials*, No.9, pp. 16–21.
29. Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Malii D.V., 2020, «Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality», *Inorganic Materials: Applied Research*, v.11, №4, pp. 815–822.

Получено 24.09.2020 г.

Принято в печать 21.02.2021 г.