

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 19. Выпуск 2

УДК 539.52:669.14.018

DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-2-163-171

Свойства уравнений теории пластичности дилатирующих материалов в концепции пластического газа¹

Макаров Эдуард Сергеевич — профессор, доктор технических наук, Тульский государственный университет.

Журавлев Геннадий Модестович — профессор, доктор технических наук, Тульский государственный университет.

e-mail: technology@tspu.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, профессор, доктор технических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого.

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Сапожников Сергей Владимирович — главный специалист, ООО «Тулачермет-Сталь».

e-mail: sapozhnikov_sv@tula-steel.ru

Сергеев Александр Николаевич — заведующий кафедрой технологии и сервиса, старший научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, профессор, доктор технических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого.

e-mail: technology@tspu.ru

Аннотация

В работе исследуются свойства уравнений, которые используются при расчете пластического формоизменения дилатирующих материалов (порошков сталей, чистых металлов, цветных сплавов) в концепции пластического газа. Приведена полная система основных уравнений теории течения жесткопластических изотропных дилатирующих сред. Рассматривается частный случай плоской деформации, для медленного установившегося пластического течения, вследствие чего начальные условия при решении задачи не формулируются. Учитывая, что сплошная среда при нагружении изменяет свою плотность, задается закон объемной сжимаемости, и привлекается условие пластичности, которые взаимно удовлетворяются. Для уравнений равновесия, неразрывности и соотношения коаксиальности девиаторов построена система уравнений, дано её аналитическое решение. Выписаны для случая плоской деформации изотропной дилатирующей среды, наделенной свойствами пластического газа, граничные условия для напряжений, плотностей и скоростей.

Ключевые слова: Свойства уравнений, пластический газ, дилатирующие изотропные материалы, плоская деформация, полная система уравнений.

Библиография: 26 названий.

Для цитирования:

Э. С. Макаров, Г. М. Журавлев, А. Е. Гвоздев, С. В. Сапожников, А. Н. Сергеев. Свойства уравнений теории пластичности дилатирующих материалов в концепции пластического газа // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19, вып. 2, С. 163–171.

¹Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по проекту №11.6682.2017/8.9

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 19. No. 2

UDC 539.52:669.14.018

DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-2-163-171

The equations of the plasticity theory properties of dilating materials in the concept of plastic gas

Makarov Eduard Sergeevich — professor, doctor of technical sciences, Tula State University.
Zhuravlev Gennady Modestovich — professor, doctor of technical sciences, Tula State University.

e-mail: technology@tspu.ru

Gvozdev Alexander Evgenievich — chief researcher of the department of technology and service, professor, doctor of technical sciences, Tula State L. N. Tolstoy Pedagogical University.

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Sapozhnikov Sergey Vladimirovich — Chief specialist, LLC «Tulachermet-Steel».

e-mail: sapozhnikov_sv@tula-steel.ru

Sergeev Alexander Nikolaevich — head of the department of technology and service, senior researcher of the department of technology and service, professor, doctor of technical sciences, Tula L.N. Tolstoy State Pedagogical University.

e-mail: technology@tspu.ru

Abstract

In paper investigate the properties of equations that are used in the calculation of the plastic deformation of dilatable materials (powder steels, pure metals, non-ferrous alloys) from the concept of plastic gas. A complete system of basic equations of the theory of the flow of rigid-plastic isotropic dilatation media is given. We consider a particular case of plane deformation, for a slow steady-state plastic flow, as a result of which the initial conditions for the solution of the problem are not formulated. Taking into account that the solid medium undergoes a change in its density under loading, the law of volume compressibility is given, and the plasticity condition is reciprocally satisfied. For equations of equilibrium, continuity and the ratio of the coaxiality of de-Viators, a system of equations is constructed, and its analytical solution is given. The boundary conditions for stresses, densities, and velocities are written out for the case of planar deformation of an isotropic dilatation medium endowed with the properties of a plastic gas.

Keywords: properties of equations, plastic gas, dilatable isotropic materials, planar deformation, complete system of equations

Bibliography: 26 titles.

For citation:

E. S. Makarov, A. E. Gvozdev, G. M. Zhuravlev, S. V. Sapozhnikov, A. N. Sergeev, 2018, "The equations of the plasticity theory properties of dilating materials in the concept of plastic gas", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 19, no. 2, pp. 163–171.

1. Введение

В практике расчетов уплотнения и резания грунтов, формования порошковых материалов и сплавов возникает необходимость учета необратимого изменения объема материала. Для описания механического поведения таких материалов часто привлекают подход, в котором конституционные соотношения формулируются в рамках концепции пластического газа. Проводимые исследования пластического формоизменения дилатирующих материалов и дальнейшее развитие техники выдвигает все более сложные задачи, эффективное решение которых связано как с уточнением математических моделей изучаемых процессов, так и с совершенствованием расчетных методов.

В работе исследуются свойства уравнений, которые используются при расчете пластического формоизменения дилатирующих материалов на основе концепции пластического газа, что позволяет более полно проводить анализ напряженно-деформированного состояния.

2. Свойства уравнений теории пластического газа

Дилатирующая среда считается жесткопластической изотропной. Массовыми силами пренебрегаем. Полная система уравнений теории течения такой среды содержит уравнения равновесия и неразрывности, условия пластичности и объемной сжимаемости и соотношения коаксиальности девиаторов напряжений и скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} = 0, \quad \rho + \rho v_{i,j} = 0, \quad f = 0, \quad \sigma = \varphi, \\ \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) - \frac{1}{3} v_{k,k} \delta_{ij} = \lambda (\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}). \end{aligned} \quad (1)$$

Для случая ортотропии полная система уравнений имеет аналогичный вид

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} = 0, \quad \rho + \rho v_{i,j} = 0, \quad f = 0, \quad \sigma^0 = \varphi, \\ \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) - \frac{1}{3} v_{k,k} \delta_{ij} = \lambda (\sigma_{ij}^0 - \sigma^0 \delta_{ij}). \end{aligned} \quad (2)$$

Системы (1) и (2) дополняются краевыми (начальными и граничными) условиями. Ниже рассматриваются медленные установившиеся течения, вследствие чего начальные условия не формулируются. Кроме того, исследование свойств уравнений проводится лишь для случая плоской деформации изотропной среды. Другие случаи рассматриваются аналогично.

Пусть в плоскости течения, совпадающей с плоскостью xy , p и τ — соответственно полусумма и полуразность главных напряжений, ψ — угол между осью x и первым главным направлением. Тогда

$$\sigma_x = p + \tau \cos 2\psi, \quad \sigma_y = p - \tau \cos 2\psi, \quad \tau_{xy} = \tau \sin 2\psi. \quad (3)$$

Напряжение σ_z находим, учитывая, что сплошная среда при нагружении изменяет свою плотность по закону

$$\sigma = \varphi(\rho), \quad (4)$$

и учитывая выражения (3), тогда:

$$\sigma_z = 3\varphi - 2p. \quad (5)$$

Для интенсивности касательных напряжений будем иметь:

$$T = \sqrt{3(p - \varphi)^2 + \tau^2}. \quad (6)$$

Привлекая условие, что существует функция нагружения [1],

$$F \equiv T - k(\sigma, \rho) = 0, \quad (7)$$

для τ можно написать

$$\tau = \sqrt{T^2 [\varphi(\rho), \rho] - 3[p - \varphi(\rho)]^2} = \tau(p, \rho). \quad (8)$$

Таким образом, с учетом формулы (8) условия пластичности и объемной сжимаемости удовлетворяются, а уравнения равновесия и неразрывности и соотношения коаксиальности девиаторов сводятся к системе:

$$p_{,x} + (\tau_p p_{,x} + \tau_\rho p_{,x} + 2\psi_{,y}) \cos 2\psi + (\tau_p p_{,y} + \tau_\rho p_{,y} + 2\tau\psi_{,x}) \sin 2\psi = 0, \quad (9)$$

$$p_{,y} - (\tau_p p_{,y} + \tau_\rho p_{,y} - 2\tau\psi_{,x}) \cos 2\psi + (\tau_p p_{,x} + \tau_\rho p_{,x} + 2\tau\psi_{,y}) \sin 2\psi = 0, \quad (10)$$

$$u\rho_{,x} + v\rho_{,y} + \rho(u_{,x} + v_{,y}) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{3}{2}(p + \tau \cos 2\psi - \varphi)(u_{,y} + v_{,x}) - (2u_{,x} - v_{,y})\tau \sin 2\psi = 0, \quad (12)$$

$$\frac{3}{2}(p - \tau \cos 2\psi - \varphi)(u_{,y} + v_{,x}) - (2v_{,y} - u_{,x})\tau \sin 2\psi = 0, \quad (13)$$

где τ_p и τ_ρ — частные производные от τ по p и ρ .

Следуя общему правилу [2], находим характеристики этой системы. Ими оказываются

а) линии тока

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u}, \quad (14)$$

б) два семейства кривых

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sin 2\psi \pm \sqrt{1 - \tau_p^2}}{\tau_p + \cos 2\psi}. \quad (15)$$

Так как

$$|\tau_p| = \sqrt{3}\sqrt{(T/\tau)^2 - 1}, \quad (16)$$

то характеристики (15) действительны при условии

$$T/\tau \leq 2/\sqrt{3}. \quad (17)$$

Две кривые (15), принадлежащие различным семействам, пересекаются под углом

$$\chi = \arccos \tau_p, \quad (18)$$

делящимся пополам первым главным направлением.

Пусть ζ — характеристика составляет с осью x угол $\alpha = \psi - \frac{1}{2}\chi$, а η -характеристика — угол $\beta = \psi + \frac{1}{2}\chi$. Тогда уравнения (9) и (10), отнесенные к сетке характеристик, примут вид:

$$p_{,\zeta} \sin \chi - 2\tau\psi_{,\zeta} - \tau_\rho \rho_{,\zeta} \operatorname{ctg} \chi + \tau_\rho \rho_{,\eta} \cos e\chi = 0, \quad (19)$$

$$p_{,\eta} \sin \chi + 2\tau\psi_{,\eta} - \tau_\rho \rho_{,\eta} \operatorname{ctg} \chi + \tau_\rho \rho_{,\zeta} \cos e\chi = 0, \quad (20)$$

Эти уравнения представляют собой обобщение известных зависимостей Хенки [3, 4].
Уравнения (12) и (13), отнесенные к той же сетке, имеют вид:

$$u_{,\zeta} \cos \alpha - u_{,\eta} \cos \beta + v_{,\zeta} \sin \alpha - v_{,\eta} \sin \beta = 0, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} u_{,\zeta} \cos(\kappa + \beta) - u_{,\eta} \cos(\kappa + \alpha) + v_{,\zeta} \sin(\kappa - \beta) - \\ - v_{,\eta} \sin(\kappa - \alpha) = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где принято обозначение

$$\kappa = \operatorname{arctg}(\sin 2\psi \sec \chi). \quad (23)$$

В случае ортогональности характеристик (15) из выражений (21) и (22) следуют уравнения Гейрингер [3, 4].

3. Граничные условия для напряжений, плотностей и скоростей

В случае плоской деформации изотропной дилатирующей среды, наделенной свойствами пластического газа, граничные условия для напряжений и плотностей имеют вид:

$$\tau |\sin 2(\psi - \gamma)| = \mu_T |p + \tau \cos 2(\psi - \gamma)|, \quad p + (-1)^n \tau = 0, \quad p + (-1)^n + q = 0 \quad (24)$$

где γ — угол между нормалью к контуру и осью x , τ дается выражением (8) (8), $n = 0, 1, 2, \dots$

Для всех случаев — плоского напряженного состояния, плоской, сферической и осесимметричной деформации — кинематические условия сводятся либо к заданию вектора скорости (условие прилипания, или полного сцепления), либо к заданию только нормальной составляющей вектора скорости (условие непроницаемости, или обтекания):

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2; \quad v_{n1} = v_{n2}. \quad (25)$$

Аналогично формулируются граничные условия для напряжений, плотностей и скоростей в задачах о пластических течениях и ортотропных дилатирующих сред.

4. Заключение

Полученное аналитическое решение позволяет определить все параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние процесса плоского пластического формоизменения дилатирующих сред. Не представляет принципиальных затруднений и рассмотрение соответствующих задач для ортотропных дилатирующих сред, наделенных свойствами пластического газа.

Результаты исследований могут быть применены в аддитивных технологиях, при компактировании, уплотнении и спекании порошковых металлических систем, а также при создании ресурсосберегающих технологий процессов обработки конструкционных материалов с применением новых наноконпозиционных смазок и покрытий [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Г. М., Гвоздев А. Е. 2014, *Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов*. Изд-во ТулГУ, Тула, 112 с.
2. Курант Р., Гильберт Д. 1945, *Методы математической физики*. Гостехиздат, М., Л., 620 с.

3. Качанов Л.М. 1969, *Основы теории пластичности*. Наука, М., 420 с.
4. Соколовский В.В. 1969, *Теория пластичности*. Высшая школа, М., 608 с.
5. Селедкин Е.М., Гвоздев А.Е., Черных Д.П. 2005, «Оптимизация режима сверхпластического деформирования заготовок из труднодеформируемых сталей», *Производство проката*, № 11, с. 2 – 8.
6. Gvozdev A.E. 2005, "Alternative technology of thermomechanical treatment of high-speed tungsten-molybdenum steel R6M5", *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 47, no. 11 – 12, pp. 556 – 559.
7. А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова 2013, «Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии», *Деформация и разрушение материалов*. № 11, с. 39 – 42.
8. А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, М.Е. Пруцков 2014, «Условия проявления нестабильности цементита при термоциклировании углеродистых сталей», *Материаловедение*, № 10, с. 31 – 36.
9. А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев 2015, «Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле», *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*, № 3 (16), с. 17 – 23.
10. А.Е. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova 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.
11. А.Е. Gvozdev, D.N. Bogolyubova, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova 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.
12. А.Е. Gvozdev, I.V. Golyshev, I.V. Minayev, A.N. Sergeyev, N.N. Sergeyev, I.V. Tikhonova, D.M. Khonelidze, A.G. Kolmakov 2015, "Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol.6, no. 4, pp. 305 – 310.
13. А.Е. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova 2015, "Role of nucleation in the of first order phase transformations", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol.6, no. 4, pp. 283 – 288.
14. А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов 2015, «Оценка взаимодействия между наночастицами диалкогогенидов вольфрама в среде жидкого смазочного материала», *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, вып. 7, ч. 2, с. 8 – 14.
15. А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков 2015, «Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в подшипниках качения», *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, вып. 11, ч. 1, с. 78 – 86.

16. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. 2015, «Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением», *Технология металлов*, № 11, с. 17 – 29.
17. Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов 2015, «Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов», *Производство проката*, № 10, с. 18 – 26
18. А.Е. Гвоздев, И.В. Голышев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Колмаков 2015, «Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов», *Материаловедение*, № 2, с. 31 – 36.
19. Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов 2017, «Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях», *Сталь*, № 6, с. 26 – 39.
20. Ф.К. Малыгин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки 2015, *Материаловедение: учебник для вузов*. ТулГУ, Тула, 268 с.
21. А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Е. Гвоздев, А.В. Сергеева, С.Н. Кутепов, 2015, *Основы строительного дела и ремонтно-отделочных работ: учебное пособие*. ТулГУ, Тула, 198 с.
22. Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, К.Г. Мирза, Ю.С. Дорохин, Д.М. Хонелидзе, 2015, *Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт автомобиля: учебное пособие*. ТулГУ, Тула, 174 с.
23. А.Д. Бреки, В.В. Кудрявцев, А.Л. Диденко, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев / под ред. А.Д. Бреки, 2015, *Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наночастиц диалкогогенидов вольфрама для узлов трения машин: монография*. ТулГУ, Тула, 128 с.
24. А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки / под ред. проф. А.Е. Гвоздева 2016, *Технология конструкционных и эксплуатационных материалов: учебник*. ТулГУ, Тула, 351 с.
25. Э.С. Макаров, А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Д. Бреки, А.Д. Малий 2017, «Применение теории пластичности дилатирующих сред к процессам уплотнения порошков металлических систем», *Чебышевский сборник*, т. 18, вып. 4, с. 226 – 242.
26. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Сапожников С.В. 2017, «К теоретическому анализу процесса компактирования порошковых материалов прессованием», *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*, вып. 4, с. 272 – 283.

REFERENCES

1. Zhuravlev, G.M. , Gvozdev, A.E. 2014, *Plastic dilatancy and deformation damage to metals and alloys*. – Tula, Tula State University.
2. Courant, R., Gilbert, D. 1945, *Methods of mathematical physics*. – Moscow, Leningrad: Gostekhizdat.

3. Kachanov, L.M. 1969, *Fundamentals of the theory of plasticity*. – Moscow: Nauka.
4. Sokolovsky, V.V. 1969, *Theory of plasticity*. – Moscow: Vysshaya shkola.
5. Seledkin, E.M., Gvozdev, A.E., Chernykh, D.P. 2005 "Optimization of the regime of superplastic deformation of blanks from tandem-formed steels", *Rolled products*. no 11. pp. 2 – 8.
6. Gvozdev, A.E. 2005, "Alternative technology of thermomechanical treatment of high-speed tungsten-molybdenum steel R6M5", *Metal Science and Heat Treatment*. vol. 47. no 11 – 12, pp. 556 – 559.
7. 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 pretransformation under thermomechanical action", *Deformation and destruction of materials*, no. 11, pp. 39 – 42.
8. Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Malyarov, A.V., Sergeev, N.N., Tikhonova, I.V., Prutkov, M.E. 2014, "Conditions for the manifestation of instability of cementite in the thermocycling of carbon steels", *Materials*, no. 10, pp. 31 – 36.
9. Breki, A.D., Tolochko, O.V., Starikov, N.E., Provotorov, D.A., Ageev, E.V., Gvozdev, A.E. 2015, "Estimation of the influence of the liquid lubricant composite material with the geomodifier nanoparticles on the friction in the bearing assembly", *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Engineering and technology*, no 3 (16), pp. 17 – 23.
10. Gvozdev, A.E., Minaev, I.V., Sergeev, N.N., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A., 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.
11. Gvozdev, A.E., Bogolyubova, D.N., Sergeev, N.N., Kolmakov, A.G., Provotorov, D.A., Tikhonova, I.V. 2015, "Features of softening processes of aluminum, copper, and their alloys under hot deformation", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, vol. 1, pp. 32 – 40.
12. 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 laser cutting of steel sheets", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, no. 4, pp. 305 – 310.
13. Gvozdev, A.E., Sergeyev, N.N., Minayev, I.V., Kolmakov, A.G., Tikhonova, I.V. 2015, "Role of nucleation in the of first-order phase transformations", *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 6, no. 4, pp. 283 – 288.
14. Breki, A.D., Tolochko, O.V., Vasileva, E.S., Gvozdev, A.E., Starikov, N.E., Provotorov, D.A. 2015, "Evaluation of the interaction between nanoparticles of tungsten dichalcogenides in a liquid lubricant medium", *Izvestia Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Technical science. Issue 7. Q2*, pp. 8 – 14.
15. Breki, A.D., Medvedeva, V.V., Fadin, Y.A., Tolochko, O.V., Vasilyeva, E.S., Sergeev, A.N., Provotorov, D.A., Gvozdev, A.E., Starikov, N.E. 2015, "Influence of the lubricant composite material with nanoparticles of tungsten disulfide on friction in rolling bearings", *Izvestia Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Issue, Technical science*, vol. 11, no. 1, pp. 78 – 86.
16. Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., Kolmakov, A.G. 2015, "Formation of the mechanical properties of carbon steels in drawing processes with thinning", *Technology of metals*, no. 11, pp. 17 – 29.

17. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, Zolotuhin, V.I., Provotorov, D.A. 2015, "Statement of the problem of calculating the deformation damaging properties of metals and alloys", *Production of rolled metal*, no. 10, pp. 18 – 26.
18. Gvozdev, A.E., Golyshev, I.V., Minaev, I.V., Sergeev, A.N., Sergeev, N.N., Tikhonova, I.V., Honilidze, D.M., Kolmakov, A.G. 2015, "Multiparametric optimization of parameters of laser cutting of steel sheets", *Materialconducting*, no. 2, pp. 31 – 36.
19. Zhuravlev, G.M., Gvozdev, A.E., Cheglov, A.E., Sergeev, N.N., Gubanov, O.M. 2017, "The option of determining the maximum plastic hardening in tool steels", *Steel*, no. 6, pp. 26 – 39.
20. Malygin, F.K., Starikov, N.E., Gvozdev, A.E., Zolotukhin, V.I., Sergeev, N.N., Breki, A.D. 2015, *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov*, Tula, Izdatelstvo Tulskogo gosudarstvennogo universiteta.
21. Sergeev, A.N., Sergeev, N.N., Izvolsky, V.V., Gvozdev, A.E., Sergeeva, A.V., Kutepov, S.N. 2015, *Osnovy stroitel'nogo dela i remontno-otdelochnykh rabot: uchebnoe posobie*, Tula, Izdatelstvo Tulskogo gosudarstvennogo universiteta.
22. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Gvozdev A.E., Mirza K.G., Dorokhin Y.S., Honeel-idze D.M. 2015, *Ekspluatatsiya, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobilya: uchebnoe posobie*, Tula, Izdatelstvo Tulskogo gosudarstvennogo universiteta.
23. Breki, A.D., Kudryavtsev, V.V., Didenko, A.L., Vasilyeva, E.S., Tolochko, O.V., Sergeev, N.N., Starikov, N.E., Gvozdev, A.E. 2015, *Tribotekhnicheskie svoystva kompozitsionnykh pokrytij s polimidnymi matricami i napolnitelyami iz nanochastich dimal'kogenidov volframa dlya uzlov treniya mashin: monografiya*, Tula, Izdatelstvo Tulskogo gosudarstvennogo universiteta.
24. Gvozdev A.E., Starikov N.E., Zolotukhin V.I., Sergeev N.N., Sergeev A.N., Breki A.D. 2016, *Tekhnologiya konstrukcionnykh i ehkspluatacionnykh materialov: uchebnik*, Tula, Izdatelstvo Tulskogo gosudarstvennogo universiteta.
25. Makarov, E.S., Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., Sergeev, A.N., Minaev, I.V., Breki, A.D., Maliy, D.V. 2017, "Application of plasticity theory of dilating media to sealing processes of powders of metallic systems". *Chebyshevskii Sbornik*, no. 18(4), pp. 268 – 284.
26. Gvozdev, A.E., Zhuravlev, G.M., Sapozhnikov, S.V. 2017, "Toward a theoretical analysis of the process of compacting powdered materials by compression molding", *Izvestia Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Earth sciences*, vol. 4, pp. 273 – 283.

Получено 09.04.2018

Принято в печать 17.08.2018