

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 2.

УДК 51-76

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-2-191-200

Математические модели внедрения стального шарообразного индентора в титановый сплав при трении в биологических смазочных средах¹

А. А. Стрельникова, А. Д. Бреки, М. А. Скотникова, Д. Г. Плотников, Ю. Подгурскас,
А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева

Стрельникова Ангелина Анатольевна — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: strelnikova.angelina@bk.ru

Бреки Александр Джалюльевич — доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Скотникова Маргарита Александровна — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Плотников Дмитрий Георгиевич — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Подгурскас Юозас — доктор технических наук, профессор, Университет Александра Стулгинскиса (г. Каунас, Литва).

e-mail: juozas.padgurskas@asu.lt

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

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

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

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Аннотация

В работе приведены результаты исследования влияния биологических смазочных сред на трибологические свойства пары трения «сталь – титановый сплав». Трибологические испытания проводились при вдавливании (царапании) на пути трения 2 мм с увеличением нагрузки от 0,030 до 10 Н на приборе MicroIndentation Tester CSM. Исследования проводили при различных условиях: сухое трение, с гиалуроновой кислотой и с биологическим маслом. Установлено, что смазочные среды биологического происхождения создают граничные смазочные слои на поверхностях трения и способны уменьшать изнашивание вследствие микрорезания. Реализована разработка и экспериментальная проверка математической модели, выражающей зависимость глубины внедрения от пути трения и других параметров.

Ключевые слова: биологические смазочные среды, высокотемпературная деформация, титановый сплав, трибологические свойства.

Библиография: 23 названий.

¹Исследование проведено в рамках гранта по программе Erasmus на обучение в весеннем семестре 2020 года. Авторы выражают благодарность сотрудникам Университета Витаутаса Великого за помощь в проведении эксперимента.

Для цитирования:

А. А. Стрельникова, А. Д. Бреки, М. А. Скотникова, Д. Г. Плотников, Ю. Подгурскас, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева. Математические модели внедрения стального шарообразного индентора в титановый сплав при трении в биологических смазочных средах // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 2, с. 191–200.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 2.

UDC 51-76

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-2-191-200

Research of the influence of biological lubricants on the tribological properties of the steel - titanium alloy friction pair²

A. A. Strelnikova, A. D. Breki, M. A. Skotnikova, D.G. Plotnikov, J. Padgurskas, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva

Strelnikova Angelina Anatolyevna — postgraduate student, Russia, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: strelnikova.angelina@bk.ru

Breki Alexander Dzhalyulevich — doctor of technical sciences, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Skotnikova Margarita Aleksandrovna — doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, Russia (St. Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Plotnikov Dmitry Georgievich — candidate of technical sciences, associate professor, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great (St. Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Padgurskas Juozas — doctor of technical sciences, professor, Alesandras Stulginskis University (Kaunas, Lithuania).

Gvozdev Alexander Evgenievich — doctor of engineering, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, associate professor, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Abstract

The paper presents the results of a study of the influence of biological lubricants on the tribological properties of the friction pair "steel - titanium alloy". Tribological tests were carried out with indentation (scratching) on a friction path of 2 mm with an increase in load from 0.030 to 10 N on a Micro Indentation Tester CSM. The studies were carried out under various conditions: dry rubbing, with hyaluronic acid and with biological oil. It was found that lubricating media of biological origin create boundary lubricating layers on friction surfaces and are able to reduce wear due to microcutting. The development and experimental verification of

²The research was carried out within the framework of a grant under the Erasmus program for training in the spring semester of 2020. The authors are grateful to the staff of Vytautas Magnus University for their help in carrying out the experiment.

a mathematical model expressing the dependence of the penetration depth on the friction path and other parameters has been implemented.

Keywords: biological lubricating media, titanium alloy, high-temperature deformation, tribological properties.

Bibliography: 23 titles.

For citation:

A. A. Strelnikova, A. D. Breki, M. A. Skotnikova, D.G. Plotnikov, J. Padgurskas, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, 2022, "Research of the influence of biological lubricants on the tribological properties of the steel-titanium alloy friction pair", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 2, pp. 191–200.

1. Введение

Последние десятилетия титановые сплавы являются объектом пристального внимания материаловедов, конструкторов, архитекторов с точки зрения возможностей использования в различных видах строительных конструкций и монументальных сооружений [1, 2, 3, 4]. Также множество работ посвящено изучению влияния различных видов обработок на механические свойства и структуру титановых сплавов [5, 6, 7, 8, 9].

Использование титановых сплавов при изготовлении деталей машин и оборудования, является общемировой тенденцией. Одно из наиболее важных применений титановые сплавы находят в сфере атомной энергетики. Из них изготавливаются полуфабрикаты теплообменного оборудования, корпусное оборудование атомных энергетических установок и турбинные лопатки [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Необходимо отметить, что для изготовления указанных деталей важно знать не только механические свойства применяемых материалов, но и их трибологические свойства. Это связано с необходимостью принятия решений на этапе опытно-конструкторской разработки деталей и узлов машин, работающих в условиях трения. Проблема изучения трибологических свойств титановых сплавов посвящен ряд исследований, например, [17, 18, 19], но результаты данных исследований не являются всеобъемлющими и требуют дополнительных уточнений, в том числе с помощью проведения экспериментальных исследований. В частности, целесообразным является проведение исследований глубины внедрения индентора в зависимости от пути трения. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования трибологических характеристик пары трения «титановый сплав 3М – сталь». В качестве основной трибологической характеристики использована величина внедрения стального индентора в контртело из титанового сплава (испытания на внедрение).

2. Методы и материалы исследования

Исследования влияния биологических смазочных сред на трибологические свойства пары трения «сталь – титановый сплав» осуществляли на приборе MicroIndentation Tester CSM. Схема испытаний приведена на рисунке 1.

В работе исследовались образцы титанового сплава 3М со степенью деформации 80%, полученные в результате высокотемпературной обработки давлением – ковкой. Образцы находятся в отожженном состоянии. Процесс трения происходил между образцами титанового сплава и стальным шариком (использовался шарик диаметром 6,35 мм из стали ШХ15). Исследования проводили при трёх условиях трения (сухом трении, с биологическим маслом (рапсовое масло с присадками) и с гиалуроновой кислотой) при вдавливании (царапании) на пути трения 2 мм с увеличением нагрузки от 0,030 до 10 Н.

Аппроксимацию и анализ экспериментальных данных осуществляли в соответствии с методиками, описанными в работах [20, 21, 22, 23]. Зависимость глубины внедрения от пути трения может быть представлена в виде следующей формулы [20]:

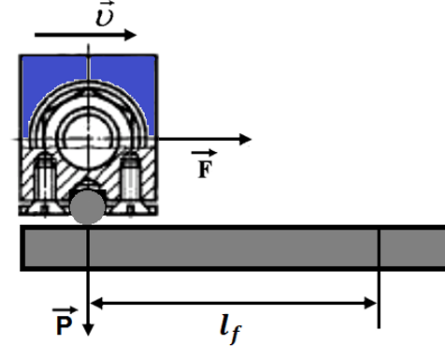


Рис. 1: Схема испытаний: F — сила тяги, v — скорость скольжения, P — нагрузка

$$h(l_f) = I \cdot l_f - \frac{\Delta I}{r} \cdot \ln(1 + \exp(r(l_f - l_{cr}))), \quad (0)$$

где h — глубина внедрения, I — интенсивность внедрения, l_f — путь трения, ΔI — приращение интенсивности внедрения при переходе к установившемуся режиму, r — резкость изменения интенсивности внедрения, l_{cr} — величина пути трения, соответствующая максимальной интенсивности внедрения.

3. Результаты и обсуждения

На рисунке 2 приведены графики результатов проведения трибологических испытаний (Scratch) образцов титанового сплава 3М со степенью деформации 80% при трении с биологическим маслом, с гиалуроновой кислотой и при сухом трении.

В результате аппроксимации экспериментальных точек, полученных при степени деформации 80% в условиях сухого трения, с использованием (2) установлена следующая зависимость:

$$h(l_f) = 10700 \cdot l_f - \left(\frac{8720}{25} \right) \cdot \ln(1 + \exp(25(l_f - 0,15))). \quad (0)$$

Из уравнения (3) следует, что в условиях сухого трения приращение (убыль) интенсивности внедрения при переходе к установившемуся режиму составило $\frac{8720}{25} \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$, резкость изменения интенсивности внедрения составила 25 мм^{-1} , а величина пути трения, соответствующая максимальной интенсивности внедрения составила 0,15 мм.

Дифференцируя (3) получим зависимость интенсивности внедрения индентора от пути трения при режиме сухого трения:

$$I(l_f) = \frac{dh}{dl_f} = 10700 - \frac{8720}{1 + \exp(-25(l_f - 0,15))}. \quad (0)$$

Из уравнения (3) следует, что исходная интенсивность внедрения ($l_f = 0$) составила $1050 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$, а установившаяся интенсивность внедрения в условиях сухого трения составила $1980 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$.

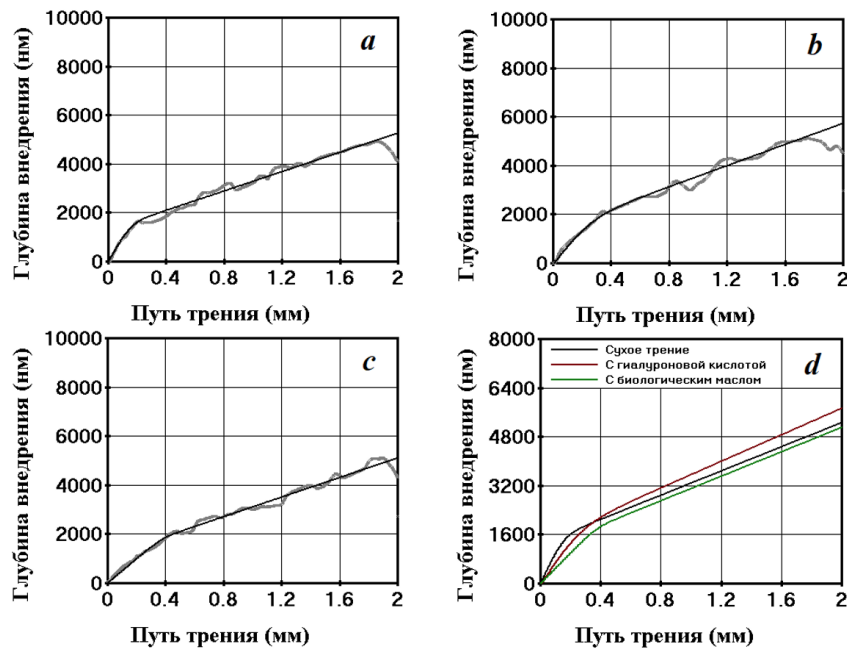


Рис. 2: Графики результатов проведения трибологических испытаний образцов со степенью деформации 80%: *a* — сухое трение; *b* — трение с гиалуроновой кислотой; *c* — трение с биологическим маслом; *d* — общий график зависимости

В условиях трения с гиалуроновой кислотой, с использованием (2) установлена следующая зависимость:

$$h(l_f) = 8400 \cdot l_f - \left(\frac{6230}{10} \right) \cdot \ln(1 + \exp(10(l_f - 0,224))). \quad (0)$$

Из уравнения (3) следует, что в условиях трения с гиалуроновой кислотой приращение (убыль) интенсивности внедрения при переходе к установившемуся режиму составило $6230 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$, резкость изменения интенсивности внедрения составила 10 мм^{-1} , а величина пути трения, соответствующая максимальной интенсивности внедрения составила 0,224 мм.

Дифференцируя (3) получим зависимость интенсивности внедрения индентора от пути трения при режиме трения с гиалуроновой кислотой:

$$I(l_f) = \frac{dh}{dl_f} = 8400 - \frac{6230}{1 + \exp(-10(l_f - 0,224))}. \quad (0)$$

Из уравнения (3) следует, что исходная интенсивность внедрения составила $7800 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$, а установившаяся интенсивность внедрения в условиях трения с гиалуроновой кислотой составила $2170 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$.

В условиях трения с биологическим маслом, с использованием (2) установлена следующая зависимость:

$$h(l_f) = 5000 \cdot l_f - \left(\frac{3000}{25} \right) \cdot \ln(1 + \exp(25(l_f - 0,37))). \quad (0)$$

Из уравнения (3) следует, что в условиях трения с биологическим маслом приращение (убыль) интенсивности внедрения при переходе к установившемуся режиму составило $3000 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$, резкость изменения интенсивности внедрения составила 25 мм^{-1} , а величина пути трения, соответствующая максимальной интенсивности внедрения составила 0,37 мм.

Дифференцируя (3) получим зависимость интенсивности внедрения индентора от пути трения при режиме трения с биологическим маслом:

$$I(l_f) = \frac{dh}{dl_f} = 5000 - \frac{3000}{1 + \exp(-25(l_f - 0,37))}. \quad (0)$$

Из уравнения (3) следует, что исходная интенсивность внедрения составила $5000 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$, а установившаяся интенсивность внедрения в условиях трения с биологическим маслом составила $2000 \frac{\text{нм}}{\text{мм}}$.

Графики функций (3), (3) и (3) приведены на рисунке 3.

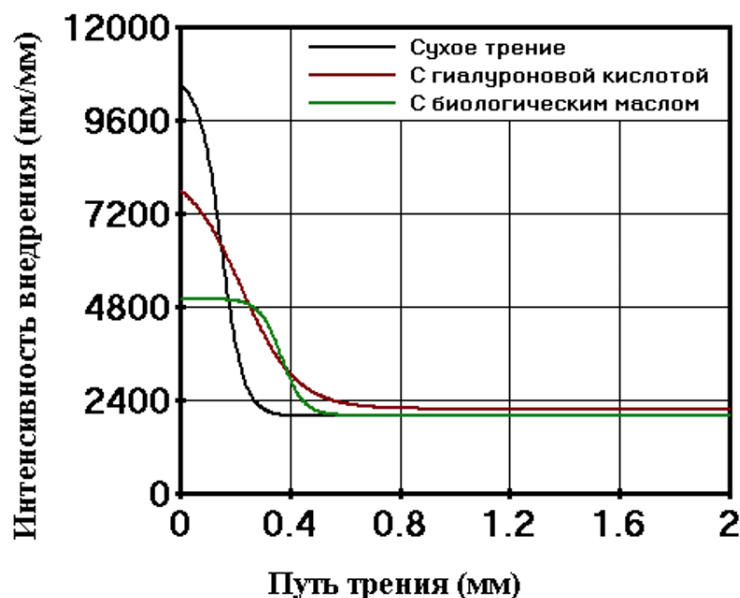


Рис. 3: Зависимости интенсивности внедрения от пути трения

Экспериментальные точки на графиках глубины внедрения (рис. 2) располагаются «ступенчатым образом», это обусловлено несколькими обстоятельствами:

1. образованием частиц фрикционного переноса при увеличении нагрузки во время проведения испытания;
2. шероховатостью поверхностей трения;
3. анизотропией поверхностных слоёв трущихся тел.

Из полученных данных следует, что при трении в среде гиалуроновой кислоты исходная интенсивность внедрения снижается на 25,7% относительно режима сухого трения, что связано с действием граничного слоя. При трении в среде биологического масла исходная интенсивность внедрения снижается на 52,4% (в 2 раза), что связано с образованием прочного граничного слоя.

При разделении тел слоем гиалуроновой кислоты величина пути трения, соответствующая максимальной интенсивности внедрения увеличилась на 47% относительно сухого трения, а в случае биологического масла в 2,5 раза, что также говорит о наличии несущей способности граничного слоя.

Установившиеся значения интенсивности внедрения для всех условий близки по величине (отличаются в пределах экспериментальной погрешности), что связано с разрывом граничных смазочных слоёв после прохождения индентором определённого пути трения.

4. Заключение

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель зависимости глубины внедрения стального шарообразного индентора в плоский образец из титанового сплава от пути трения описывает как нелинейное, так и линейное изменение данной трибологической характеристики.
2. Биологические смазочные среды способствуют образованию граничных слоёв на поверхностях трения, что создаёт объективные предпосылки для снижения изнашивания вследствие микрорезания.
3. Из полученных данных следует, что при трении в среде биологического масла исходная интенсивность внедрения снижается на 36% (а путь трения до максимальной интенсивности внедрения увеличился на 65%) относительно гиалуроновой кислоты, что связано с более высокой несущей способностью смазочного слоя.
4. Так как непрерывно происходит совершенствование материалов и конструкций машин и оборудования, то очень актуальным является не только применение уже известных методов исследования материалов и анализа экспериментальных данных, но также развитие и совершенствование методов и методик исследования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tomoyuki Kaya. Recent developments in Research, production and application of titanium in Japan / Kaya Tomoyuki // Ti-2007. Science and technology. Proceedings of the 11th World conference on titanium. Kyoto. Japan. 2007. pp. 49–56.
2. Wang Hao. Overview and prospect of the world titanium emerging applications market / Hao Wang // Ti-2011. Science and technology. Proceedings of the 12th World conference on titanium. Beijing. China. 2011. pp. 2227–2231.
3. Niinomi Mitsuo Recent trends in titanium research and development in Japan / MitsuoNiinomi // Ti-2011. Science and technology. Proceedings of the 12th World conference on titanium. Beijing. China. 2011. pp. 30–37.
4. Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami. Recent topics of titanium research and development in Japan / MitsuoNiinomi, Kazuo Kagami // Ti-2015. Science and technology. Proceedings of the 13th World conference on titanium. SanDiego. USA. 2016. pp. 27–40.
5. Jing Li, Jianzhong Zhou, Aixin Feng, Shu Huang, XiankaiMeng, Yunhui Sun, Yunjie Sun, Xuliang Tian and Yu Huang, Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature, Materials Science & Engineering A, 734, 2018, pp. 291–298.
6. L.C. Zhou, Y.H. Li, W.F. He, G.Y. He, X.F. Nie, D.L. Chen, Z.L. Lai, Z.B. An, Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening, Materials Science & Engineering A. 578 (2013) 181–186.
7. R. Shi, Z.H. Nie, Q.B. Fan, F.C. Wang, Y. Zhou, X. Liu, Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy, Materials Science & Engineering A. 715 (2018), 101–107.

8. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства и структуру экспериментальной композиции высокопрочного псевдо- β -титанового сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). С. 22–29.
9. Sokolov S.A., Plotnikov D.G., Grachev A.A., Lebedev V.A. Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data. *International Review of Mechanical Engineering*, 2020, 14(2), С. 146–150.
10. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Ivanova G.V., Tsvetkova A.A. (2015) Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment. In: *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. 22:93-101.
11. Shaboldo O.P., Vitorskii Y.M., Skotnikova M.A. (2017) Formation of the structure and properties of β -type titanium alloy upon thermomechanical treatment. *Physics of Metals and Metallography* 18:75-80.
12. Скотникова М.А., Иванова Г.В., Попов А.А., Паитова О.В. Локализация пластической деформации в ГПУ-кристаллах при вдавливании и царапании. Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 6-й международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. с. 402–412.
13. Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Strelnikova A.A. Macromechanism destruction of structurally and crystallographically textured titanium billets/ *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2019. Pp. 1097–1105.
14. Skotnikova M.A., Strelnikova A.A., Ivanova G.V., Popov A.A. Syundyukov I.S. Localization of plastic deformation in austenitic steel at low-temperature cycling loading/ *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2020. Pp. 175–182.
15. Skotnikova M.A., Krylov N.A. About the Nature of Dissipative Processes in Cutting Treatments of Titanium Vanes / *Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”*, Saint Petersburg, Russia, June 2016. Springer - Verlag. Berlin-Heidelberg. 2017. Pp. 115–124.
16. Cong Li, Like Qin, Ming Li, Hui Xiao, Qi Wang, Jian Chen, Influence of deformation strain rate on the mechanical response in a metastable b titanium alloy with various microstructures, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 815, (2020)
17. Белый А.В., Кукареко В.А., Кононов А.Г. и др. // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – № 6. – С. 571–577.
18. Чертовских С. В. Триботехнические характеристики ультрамелкозернистого титана и его сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008.
19. В.М. Савостиков, А.И. Потекаев, А.Н. Табаченко, Е.Ф. Дударев, И.А. Шулепов, Физико-механические и трибологические свойства титановых сплавов с градиентным антифрикционным покрытием Ti–C–Mo–S, *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2012. – Т. 55. – № 9. – С. 71–77.
20. Breki, A.D., Chulkin, S.G., Gvozdev, A.E., Kuzovleva, O.V. On the evolution of mathematical models of friction sliding of solids // *Chebyshevskii Sbornik* this link is disabled, 2020, 21(4), С. 327–332.

21. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kuzovleva O.V., Kuzovlev V.Yu. Empirical mathematical models of plasticity, strength and wear resistance of materials on the example of P18 steel // *Chebyshevskii Sbornik* this link is disabled, 2020, 21(3), стр. 272–291.
22. Breki, A.D., Chulkin, S.G., Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G. Mathematical Simulation of the Sliding Friction of Silicon Carbide in an Aqueous Medium // *Russian Metallurgy (Metally)* this link is disabled, 2021, 2021(4), стр. 507–511.
23. Breki, A.D., Chulkin, S.G., Gvozdev, A.E., Kolmakov, A.G., Kuzovleva, O.V. Empirical Mathematical Model for the Wear Kinetics of Porous Gas-Thermal Coatings // *Russian Metallurgy (Metally)* this link is disabled, 2021, 2021(4), стр. 496–500.

REFERENCES

1. Tomoyuki Kaya. 2007, “Recent developments in Research, production and application of titanium in Japan”, Ti-2007. *Science and technology. Proceedings of the 11th World conference on titanium*, Kyoto, Japan. pp. 49–56.
2. Wang Hao. 2011, “Overview and prospect of the world titanium emerging applications market”, Ti-2011. *Science and technology. Proceedings of the 12th World conference on titanium*, Beijing. China. pp. 2227–2231.
3. Niinomi Mitsuo 2011, “Recent trends in titanium research and development in Japan”, Ti-2011. *Science and technology. Proceedings of the 12th World conference on titanium*, Beijing. China. pp. 30–37.
4. Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami. 2016, “Recent topics of titanium research and development in Japan”, Ti-2015. *Science and technology. Proceedings of the 13th World conference on titanium*, San Diego. USA. pp. 27–40.
5. Jing Li, Jianzhong Zhou, Aixin Feng, Shu Huang, XiankaiMeng, Yunhui Sun, Yunjie Sun, Xuliang Tian and Yu Huang, 2018, “Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature”, *Materials Science & Engineering A*, 734, pp. 291–298.
6. L.C. Zhou, Y.H. Li, W.F. He, G.Y. He, X.F. Nie, D.L. Chen, Z.L. Lai, Z.B. An, 2013, “Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening”, *Materials Science & Engineering A*. 578. pp. 181–186.
7. R. Shi, Z.H. Nie, Q.B. Fan, F.C. Wang, Y. Zhou, X. Liu, 2018, “Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy”, *Materials Science & Engineering A*. 715. pp. 101–107.
8. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A. 2018, “Influence of heat treatment modes on mechanical properties and structure of experimental composition of high-strength pseudo- β -titanium alloy”, *Trudy VIAM*. No. 6 (66). pp. 22–29.
9. Sokolov S.A., Plotnikov D.G., Grachev A.A., Lebedev V.A. 2020, “Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data”, *International Review of Mechanical Engineering*, 14 (2). pp. 146–150.
10. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Ivanova G.V., Tsvetkova A.A. 2015, “Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment”, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. pp. 93–101.

11. Shaboldo O.P., Vitorskii Y.M., Skotnikova M.A. 2017, "Formation of the structure and properties of β -type titanium alloy upon thermomechanical treatment", *Physics of Metals and Metallography*, pp. 75–80.
12. Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Popov A.A., Paitova O.V. 2017, *Localization of plastic deformation in hcp crystals upon indentation and scratching. Modern mechanical engineering: Science and education: materials of the 6th international scientific and practical conference*, Ed. A.N. Evgrafova and A.A. Popovich. SPb.: Publishing house of Polytechnic. University. 402–412.
13. Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Strelnikova A.A. 2019, "Macromechanism destruction of structurally and crystallographically textured titanium billets", *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham. pp. 1097–1105.
14. Skotnikova M.A., Strelnikova A.A., Ivanova G.V., Popov A.A. Syundyukov I.S. 2020, "Localization of plastic deformation in austenitic steel at low-temperature cycling loading", *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 175–182.
15. Skotnikova M.A., Krylov N.A. 2017, "About the Nature of Dissipative Processes in Cutting Treatments of Titanium Vanes», *Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference "Modern Engineering: Science and Education"*, Saint Petersburg, Russia, June 2016. Springer - Verlag. Berlin-Heidelberg. pp. 115–124.
16. Cong Li, Like Qin, Ming Li, Hui Xiao, Qi Wang, Jian Chen. 2020, "Influence of deformation strain rate on the mechanical response in a metastable b titanium alloy with various microstructures", *Journal of Alloys and Compounds*. V.815.
17. Bely A.V., Kukareko V.A., Kononov A.G. and etc. 2008, "Friction and wear". T.29. No.6. pp. 571–577.
18. Chertovskikh S.V. 2008, "Tribotechnical characteristics of ultrafine-grained titanium and its alloys": Author. dis. ... Cand. tech. sciences.
19. Savostikov V.M., Potekaev A.I., Tabachenko A.N., Dudarev E.F., Shulepov I.A. 2012, "Physico-mechanical and tribological properties of titanium alloys with gradient antifriction coating Ti – C – Mo – S", *Bulletin of higher educational institutions. Physics*, Vol. 55, No.9. pp. 71–77.
20. Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kuzovleva O.V. 2020, "On the evolution of mathematical models of friction sliding of solids", *Chebyshevskii Sbornik*, 21 (4). pp. 327–332.
21. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kuzovleva O.V., Kuzovlev V.Yu. 2020, "Empirical mathematical models of plasticity, strength and wear resistance of materials on the example of P18 steel", *Chebyshevskii Sbornik*, 21 (3), pp. 272–291.
22. Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2021, "Mathematical Simulation of the Sliding Friction of Silicon Carbide in an Aqueous Medium", *Russian Metallurgy (Metally)*, 4, pp. 507–511.
23. Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Kuzovleva O.V. 2021, "Empirical Mathematical Model for the Wear Kinetics of Porous Gas-Thermal Coatings", *Russian Metallurgy (Metally)*, 4, pp. 496–500.

Получено 27.02.22

Принято в печать 22.06.2022