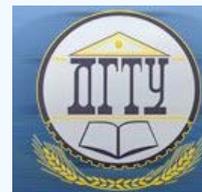


# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

## MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 + 621.2.082.18

10.23947/1992-5980-2017-17-2-31-37

### Оценка трибоэлектрических характеристик быстрорежущих сталей \*

А. А. Рыжкин<sup>1</sup>, Е. В. Фоминов<sup>2</sup>, Ю. А. Тороп<sup>3\*\*</sup><sup>1,2,3</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

### Estimation of triboelectric properties of high-speed steels \*\*\*

А. А. Ryzhkin<sup>1</sup>, E. V. Fominov<sup>2</sup>, Y. A. Torop<sup>3\*\*</sup><sup>1,2,3</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

*Введение.* Статья посвящена прогнозированию эксплуатационных свойств существующих и вновь разрабатываемых быстрорежущих сталей в зависимости от их химического состава путём изучения термодинамических процессов в зоне трения при резании и получения аналитических зависимостей для оценки характеристик трения и износа. Целью настоящей работы является прогнозирование износостойкости быстрорежущих сталей по структурно-чувствительным параметрам абсолютной или относительной термо-ЭДС материала и энтропии, которая может быть рассчитана по правилу аддитивности при известном химическом составе.

*Материалы и методы.* Установлена теоретическая зависимость между изменением энтропии сталей и их термо-ЭДС, согласно которой большему значению энтропии материала соответствует меньшее значение абсолютной ЭДС, что было проверено на различных марках быстрорежущих сталей.

*Результаты исследования.* С целью выявления связи между энтропией, как термоэлектрической характеристикой быстрорежущих сталей, и их износостойкостью были проведены испытания на трение цилиндрических образцов быстрорежущих сталей различных марок и стойкостные исследования свёрл при обработке стали 45. Произведены измерения относительных термо-ЭДС этих марок и рассчитаны их абсолютные значения. В результате испытаний наибольшую износостойкость показали быстрорежущие стали с высокими значениями энтропий и минимальными значениями абсолютных (относительных) термо-ЭДС.

*Обсуждение и заключения.* Установлена связь между параметрами износостойкости быстрорежущих сталей и их структурно-чувствительными характеристиками на микроуровне — энтропией и абсолютной термо-ЭДС. Для снижения износа при трении и резании необходимо применять марки быстрорежущих сталей с максимальной энтропией и минимальной термо-ЭДС.

Энтропию, которая без особых затруднений рассчитывается по известному химическому составу материала, можно использовать как для оценки эксплуатационных свойств существующих, так и для прогнозирования износостойкости вновь разрабатываемых марок быстрорежущих сталей.

*Introduction.* The paper is devoted to forecasting the operational properties of the existing and newly developed high speed steels depending on their chemical composition by the investigation of thermodynamic processes in the friction zone under cutting, and by receiving analytical dependences for evaluating friction and wear characteristics. The work objective is the prediction of wear resistance of high speed steels on the base of the structural sensitive parameters of the absolute or relative thermo-EMF and entropy of the material which can be calculated by the additivity rule at the known chemical composition.

*Materials and Methods.* The theoretical relationship between the change in entropy of steels and their thermo-EMF is obtained. According to it, a smaller value of the absolute thermo-EMF corresponds to a larger value of the material entropy. This theoretical relationship is experimentally tested on various compositions of high speed steels.

*Research Results.* To determine the relationship between entropy as a thermoelectric characteristic of high speed steels and their wear resistance, experimental tests on friction for the cylindrical samples of high speed steels of different types, and study on the wear properties of drills under steels machining are carried out. Measurements of relative thermo-EMF of these samples are performed; and their absolute values are calculated. The results of these tests show maximum wear resistance of high-speed steels having high values of entropy and low values of the absolute (relative) thermo-EMF.

*Discussion and Conclusions.* The relationship between the wear resistance parameters of high speed steels and their structurally-sensitive characteristics at the micro-level – entropy and absolute thermo-EMF, is established. To reduce wear during friction and cutting, it is necessary to apply the types of high speed steels with maximal entropy and minimal thermo-EMF. Entropy, which with ease can be calculated on the known chemical composition of the material, can be used to assess the operating properties and to predict the wear resistance of both existing and newly developed compositions of high speed steels.

\* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

\*\*E-mail: ryzhkin.anatolia@yandex.ru, fominoff83@mail.ru, yuriy.torop87@mail.ru

\*\*\* The research is done within the frame of independent R&amp;D.

**Ключевые слова:** инструментальные режущие материалы, быстрорежущие стали, термо-ЭДС, энтропия, износостойкость, высокоэнтропийные быстрорежущие стали.

**Keywords:** tool cutting materials, high speed steels, thermo-EMF, entropy, wear resistance, high entropy quick-speed steels.

**Введение.** Среди основных современных тенденций повышения эксплуатационных характеристик инструментальных режущих материалов можно выделить такое направление, как создание новых марок быстрорежущих сталей (БРС), усложнение их химического состава введением новых легирующих элементов. В этом случае важно уметь прогнозировать свойства существующих и вновь разрабатываемых БРС в зависимости от их химического состава путём изучения термодинамических процессов в зоне трения при резании и получения аналитических зависимостей для оценки характеристик трения и износа.

Наиболее важным эксплуатационным свойством лезвийных инструментов, в том числе изготовленных из БРС, является их износостойкость. Интенсивность изнашивания БРС можно оценить по зависимости, полученной на основе уравнения баланса энтропии [1,2], из которой следует вывод о том, что износ при трении и резании будет меньше у материалов с наибольшим значением энтропии.

**Теоретические предпосылки.** Для оценки и прогнозирования износостойкости можно использовать структурно-чувствительный параметр микроуровня — абсолютную термо-ЭДС материала  $\epsilon$ , которая, как известно из теории термоэлектрических явлений [3–6], есть энтропия движущихся носителей тока — электронов  $S_e$  и может быть определена как отношение теплоты переноса  $Q_e$  к абсолютной температуре  $T$ :

$$S_e = \frac{Q_e}{T}$$

По аналогичной зависимости определяется и тепловая энтропия  $S$  как функция термодинамического состояния материала. Поэтому можно предположить наличие функциональной связи между тепловой энтропией материала  $S$  и его абсолютной термо-ЭДС. В работе [7] для оценки изменения потенциала Гиббса  $\Delta G$  реакции используется ЭДС гальванического элемента  $E$  и аналитическая зависимость для определения  $\Delta G$ :

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E$$

Но изменение потенциала Гиббса  $\Delta G$  материала определяется как

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

В результате

$$\Delta H - T \cdot \Delta S = -n \cdot F \cdot E$$

Откуда

$$E = -\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{F \cdot n}, \quad (1)$$

где  $F$  — число Фарадея,  $n$  — число электронов.

Полученная зависимость устанавливает связь между изменением энтропии материала  $\Delta S$  и его термо-ЭДС  $E$ : большему значению энтропии материала соответствует меньшее значение его ЭДС при допущении, что процесс совершается при неизменных энтальпии  $\Delta H$  и температуре  $T$ .

Энтропии БРС разных марок рассчитываются по правилу аддитивности [8] в зависимости от их химического состава по формуле:

$$S_{i,j} = \eta_i \cdot S_i + \eta_j \cdot S_j$$

где  $S_i$  и  $S_j$  — энтропия каждого компонента сплава,  $\eta_{i,j}$  — мольная доля каждого компонента,  $\sum \eta_{i,j} = 1$ . Результаты расчётов представлены в таблице 1 (графа 3).

Теоретическая зависимость (1) и вытекающие из нее выводы были проверены на различных инструментальных режущих материалах. На рис. 1 представлены результаты расчетных значений энтропий разных марок быстрорежущих сталей и их сравнение с ЭДС относительно платины. Как видно, существует связь между энтропией БРС, как термодинамической характеристикой, и относительной (абсолютной) термо-ЭДС, которая в первом приближении отображается кривой гиперболического типа.

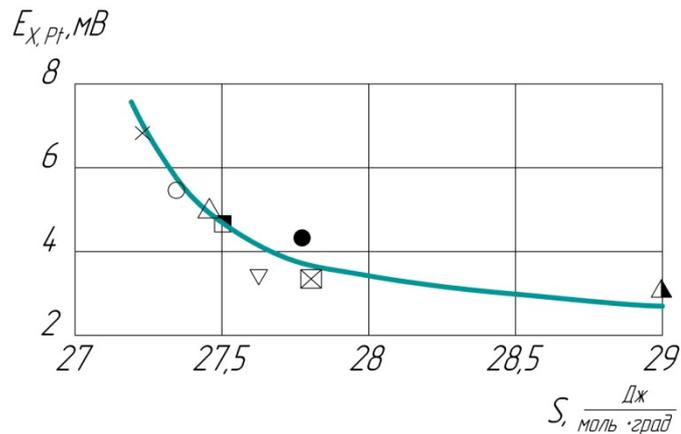


Рис. 1. Связь между энтропией и термо-ЭДС для быстрорежущих сталей разных марок (ГОСТ 19265–73): ▽ — P6Ф2К8М5, ▲ — P12Ф2К8М3, ○ — P18, — P6М4Ф4, × — P6М5, ⊠ — P6М5К5, ◼ — P8М3Ф4, ● — P9Ф5

Fig. 1. Relationship between entropy and thermo-EMF for high-speed steels of different types (GOST 19265-73):

△ ▽ — P6Ф2К8М5, ▲ — P12Ф2К8М3, ○ — P18,  
 △ — P6М4Ф4, × — P6М5, ⊠ — P6М5К5, ◼ — P8М3Ф4, ● — P9Ф5

**Экспериментальная часть.** Для установления связи между энтропией, как термоэлектрической характеристикой БРС, и их износостойкостью были проведены трибологические испытания цилиндрических образцов БРС диаметром 5 мм с помощью приспособления, установленного на станке модификации 1К625, позволяющего измерять красностойкость, температуру и силу трения при различных значениях удельного давления и скорости трения (рис. 2).

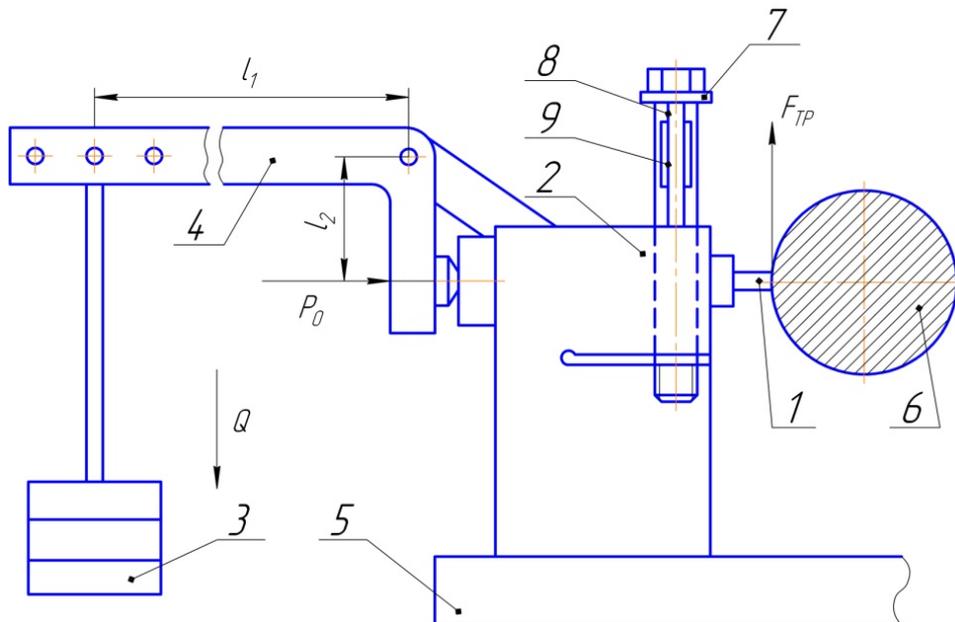


Рис. 2. Схема приспособления для трибологических испытаний

Fig. 2. Diagram of device for tribological testing

Образец 1 имеет возможность перемещаться в корпусе 2 приспособления под действием груза 3 и рычага 4. Корпус расположен на основании 5, жестко закрепленном на поперечном суппорте станка. В центре станка закреплен вал 6. В корпусе имеется прорезь, благодаря чему перемещения образца через стойку 7 и балку 8 регистрируются тензодатчиками сопротивления 9.

Время, за которое выбранный путь трения будет пройден при заданной частоте вращения вала 6, определяется из соотношения:

$$t_{TP} = \frac{10^3 \cdot L_{TP}}{\pi \cdot D \cdot n}$$

где  $L_{TP}$  — выбранный путь трения, м;  $D$  — диаметр вала, мм;  $n$  — частота вращения, об/мин.

При испытаниях принимали скорость трения 0,16–1,3 м/с и удельные давления 30–60 МПа. Путь трения равнялся 1000 м. Результаты исследований представлены на рисунке 3. Сравнительную износостойкость образцов определяли по методике из работы [9]. В результате испытаний на трение и износ наилучшими по всем показателям следует считать стали Р6М4Ф4, Р9Ф5 и Р6Ф2К8М5.

Этот вывод был подвергнут дальнейшей проверке при сверлении в стали 45 (НВ 197) отверстий диаметром 13 мм глубиной 40 мм на вертикально-сверлильном станке модификации 2А125 с подачей 0,28 мм/об и скоростью резания 0,36 м/с при обильном охлаждении 5% раствором эмульсола с расходом 5 л/мин.

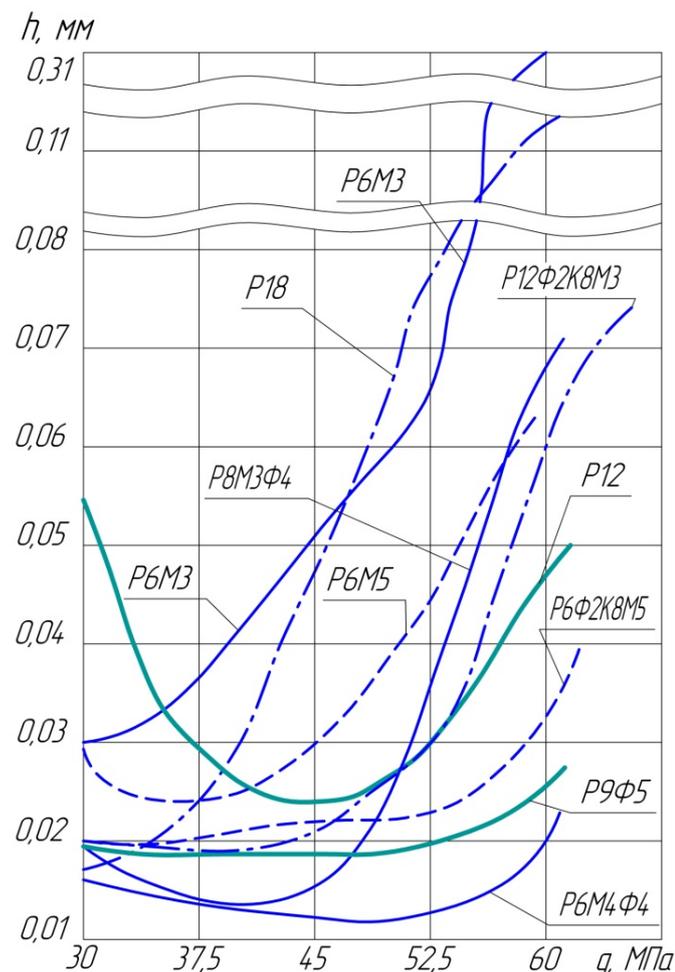


Рис. 3. Зависимость линейного износа  $h$  образцов от удельного давления при  $V = \text{const} = 0,33$  м/с

Fig. 3. Dependence of linear wear rate  $h$  of samples on specific pressure at  $V = \text{const} = 0,33$  м / s

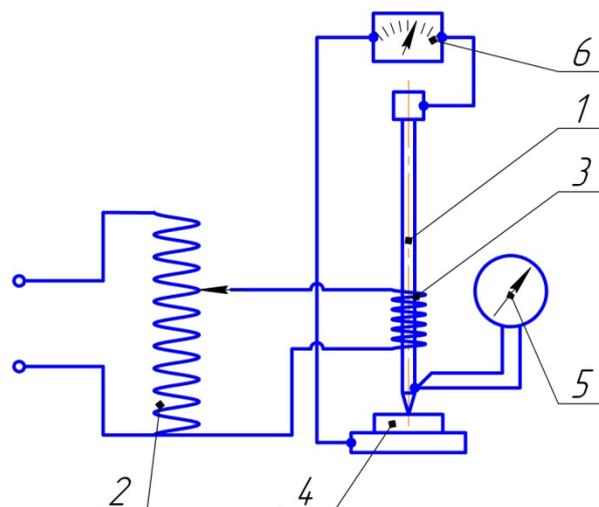


Рис. 4. Электрическая схема установки для измерения термо-ЭДС

Fig. 4. Electrical diagram of installation for measuring thermo-EMF

Всего испытано 225 свёрл — по 25 образцов, изготовленных из каждой марки стали. Износ свёрл измеряли после обработки 20 отверстий; стойкость  $T$  оценивали числом отверстий, просверленных до переточки. Результаты стойкостных испытаний, обработанные с использованием элементов теории надёжности [10], представлены в таблице 1 (графы 4–6). Видно, что наилучшие режущие свойства показали свёрла из сталей Р12Ф2К8М3, Р6Ф2К8М5 и Р6М4Ф4.

Были произведены измерения термо-ЭДС образцов БРС при помощи приспособления, электрическая схема которого представлена на рисунке 4.

Вольфрамовый стержень 1 диаметром 1,6–2,0 мм, нагреваемый до необходимой температуры при помощи лабораторного трансформатора 2 и спирали 3, соприкасается с исследуемым образцом 4. Температура стержня определяется посредством термопары и милливольтметра 5. Величину возникающей при этом термо-ЭДС фиксируют вольтметром 6. В таблице 1 (столбец 1–2) и на рис. 5 приведены значения абсолютных термо-ЭДС БРС.

Связь термо-ЭДС с данными по интенсивности изнашивания и экспериментальными результатами стойкостных испытаний свёрл из быстрорежущих сталей разных марок наглядно представлена на рис. 6, из которого следует, что наиболее эффективны стали, имеющие минимальные значения термо-ЭДС.

Физические и эксплуатационные характеристики БРС  
Physical and operational characteristics of HSS

Марки сталей	Абсолютная термо-ЭДС E, мкВ/°C	Энтропия S <sup>0</sup> , Дж/моль °C	Интенсивность изнашивания, J*10 <sup>-8</sup>	Стойкость свёрл, шт. отв.	
				средняя	Гарантийная (вероятность 0,9)
1	2	3	4	5	6
P18	15,2	28,04	2,5	144	66
P6M5	15,0	27,26	3,0	178	82
P6M4Ф4	13,5	27,46	2,5	245	68
P4M4Ф4	8,7	27,3	-	102	68
P8M3Ф4	10,8	27,53	1,6	175	70
P9Ф5	11,5	27,83	1,5	145	69
P6Ф2К8М5	4,2	30,60	1,5	241	90
P12Ф2К8М3	6,1	30,78	1,4	332	130

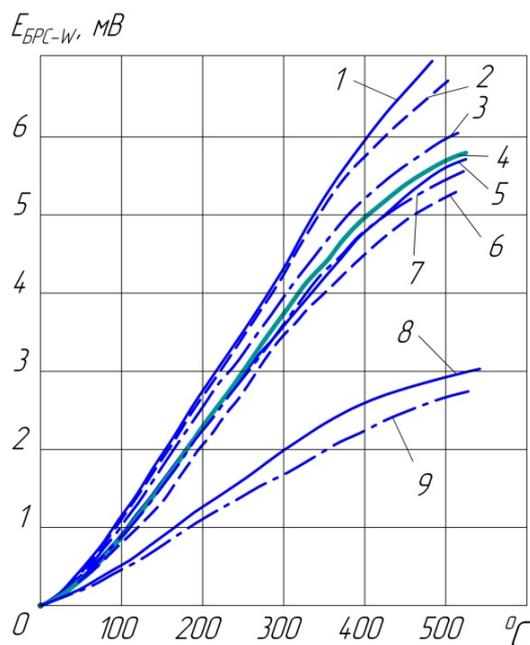


Рис. 5. Значения термо-ЭДС различных марок БРС относительно вольфрама. Кривые: 1 — P6M5; 2 — P6M4Ф4; 3 — P18; 4 — P6M3; 5 — P12; 6 — P9Ф5; 7 — P8M3Ф4; 8 — P12Ф2К8М3; 9 — P6Ф2К8М5

Fig. 5. Values of thermo-EMF of different HSS types relative to tungsten. Curves: 1 - P6M5; 2 - P6M4F4; 3 - P18; 4 - P6M3; 5 - P12; 6 - P9F5; 7 - P8M3F4; 8 - P12F2K8M3; 9 - P6F2K8M5

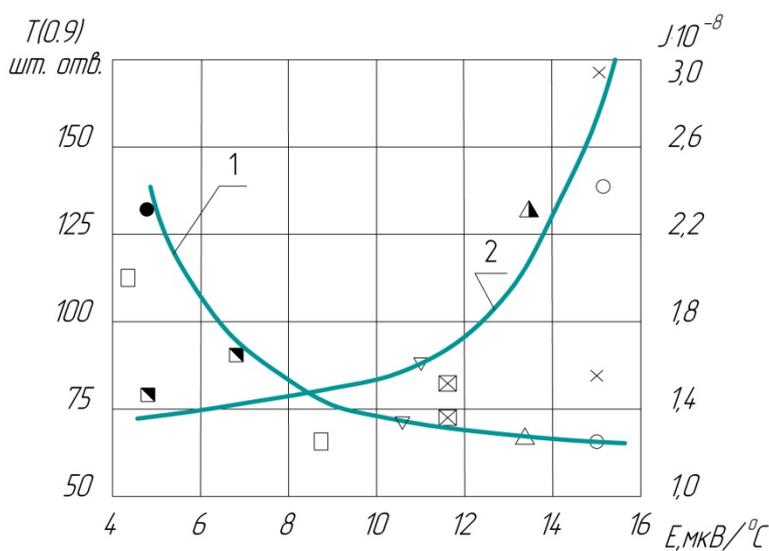


Рис.6. Взаимосвязь абсолютной термо-ЭДС и интенсивности изнашивания БРС при трении (кривая 2) и гарантийной стойкости свёрл при резании (кривая 1) для разных марок быстрорежущих сталей. Кривые:  $\blacksquare$  — P6Ф2К8М5,  $\bullet$  — P12Ф2К8М3,  $\circ$  — P18,  $\square$  — P4M4Ф4,  $\triangle$  — P6M4Ф4,  $\times$  — P6M5,  $\blacktriangle$  — P6M5K5,  $\nabla$  — P8M3Ф4,  $\boxtimes$  — P9Ф5

Fig.6. Relationship between absolute thermo-EMF and HSS wear rate under friction (curve 2), and warranty of drills under cutting (curve 1) for different HSS types. Curves:  $\blacksquare$  — P6F2K8M5,  $\bullet$  — P12F2K8M3,  $\circ$  — P18,  $\square$  — P4M4F4,  $\triangle$  — P6M4F4,  $\times$  — P6M5,  $\blacktriangle$  — P6M5K5,  $\nabla$  — P8M3F4,  $\boxtimes$  — P9F5

**Выводы.**

1. Установлена связь между износостойкостью быстрорежущих сталей и структурно-чувствительными характеристиками материалов на микроуровне — энтропией и абсолютной термо-ЭДС. Для снижения износа БРС при трении и резании необходимо применять марки БРС с максимальной энтропией и минимальной термо-ЭДС.

2. Так как расчёт энтропий материалов не вызывает затруднений, то этот показатель может быть использован для прогнозирования износостойкости вновь разрабатываемых марок БРС.

**Библиографический список**

1. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: физические основы: уч. пособие / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1996. — 242 с.
2. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект) / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 322 с.
3. Рыжкин, А. А. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов / А. А. Рыжкин, В. В. Илясов // Вестник машиностроения. — 2000. — №12. — С.32–40.
4. Morgner W. Untersuchung mikroskopischer Inhomogenitäten in Stählen durch Kontaktthermokrafftmessung / W. Morgner, B. Becker, H.-J. Spies // WZ der TH Otto von Guericke, Magdeburg. — 1970. — Heft 1, №14. — S.3–11.
5. Выбор оптимальных режимов изнашивания по трибоэлектрическим характеристикам зоны резания / А. А. Рыжкин [и др.] // Проблемы трибоэлектрохимии: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. — Новочеркасск, 2006. — С.207–210.
6. Ryshkin A. Uber die elektrischen Erscheinungen beim Spanen von Metallen/ A. Ryshkin // WZ der Karl-Marx-Stadt. — 1973. — Heft 4, №15. — S.711–725.
7. Карапетьянц, М. Х. Введение в теорию химических процессов / М.Х. Карапетьянц. — Москва : Высшая школа, 1975. — 330 с.
8. Оценка работоспособности высокоэнтропийных инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин [и др.] // Трение и износ. — 2016. — №1. — С.60–69.
9. Износостойкость новых марок быстрорежущих сталей / А. А. Рыжкин [и др.] // Металлорежущие станки и прогрессивные методы обработки металлов резанием: сборник статей — Ростов-на-Дону : Изд. центр РИСХМ, 1972. — С. 82–87.
10. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery. — Eighth edition, John Wiley & Sons, 2013. — 757 p.

**References**

1. Ryzhkin, A.A. Obrabotka materialov rezaniem: fizicheskie osnovy. [Processing of materials by cutting: physical basics.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1996, 242 p. (in Russian).
2. Ryzhkin, A.A. Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh rezhushchikh materialov (triboelektricheskiy aspekt). [Synergetics of cutting-tool materials wear (triboelectric aspect)]. Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2004, 322 p. (in Russian).
3. Ryzhkin, A.A., Ilyasov, V.V. O svyazi mezhdru iznosostoykost'yu i fizicheskimi svoystvami instrumental'nykh materialov. [On the relationship between wear resistance and physical properties of tool materials.] Vestnik Mashinostroeniya, 2000, no. 12, pp. 32–40 (in Russian).
4. Morgner, W., Becker, B., Spies, H.-J. Untersuchung mikroskopischer Inhomogenitäten in Stählen durch Kontaktthermokrafftmessung. WZ der TH Otto von Guericke, Magdeburg, 1970, Heft 1, №14, S. 3–11.
5. Ryzhkin, A.A., et al. Vybora optimal'nykh rezhimov iznashivaniya po triboelektricheskim kharakteristikam zony rezaniya. [Selection of optimal wear modes due to triboelectric characteristics of the cutting zone.] Problemy triboelektrokhimii: sb. trudov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Problems of triboelectrochemistry: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] Novocheerkassk, 2006, pp. 207–210 (in Russian).
6. Ryshkin, A. Uber die elektrischen Erscheinungen beim Spanen von Metallen. WZ der Karl-Marx-Stadt, 1973, Heft 4, №1, S.711–725.
7. Karapetyants, M.K. Vvedenie v teoriyu khimicheskikh protsessov. [Introduction to the theory of chemical processes.] Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 330 p. (in Russian).
8. Ryzhkin, A.A. et al. Otsenka rabotosposobnosti vysokoentropiinykh instrumental'nykh rezhushchikh materialov. [Determination of the efficiency of high-entropy cutting tool materials.] Journal of Friction and Wear, 2016, no. 1, pp. 60–69 (in Russian).
9. Ryzhkin, A.A. et al. Iznosostoykost' novykh marok bystrorezhushchikh staley. [Wear resistance of new types of high-speed steels.] Metallorezhushchie stanki i progressivnye metody obrabotki metallov rezaniem: sbornik statey. [Metal-

cutting machines and advanced methods of metal cutting: coll. of sci. papers.] Rostov-on-Don: RISKHM Publ. Centre, 1972, pp. 82–87 (in Russian).

10. Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. Eighth edition, John Wiley & Sons, 2013, 757 p.

Поступила в редакцию 11.01.2017

Сдана в редакцию 11.01.2017

Запланирована в номер 05.04.2017

Received 11.01.2017

Submitted 11.01.2017

Scheduled in the issue 05.04.2017

*Об авторах.*

**Рыжкин Анатолий Андреевич,**

заведующий кафедрой «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2483-8567>

[ryzhkin.anatolia@yandex.ru](mailto:ryzhkin.anatolia@yandex.ru)

**Фоминов Евгений Валерьевич,**

ведущий электроник кафедры «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

[fominoff83@mail.ru](mailto:fominoff83@mail.ru)

**Тороп Юрий Алексеевич,**

ведущий инженер кафедры «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2722-8107>

[yuriy.torop87@mail.ru](mailto:yuriy.torop87@mail.ru)

*Authors.*

**Ryzhkin, Anatoly A.**

Head of the Tool Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2483-8567>  
[ryzhkin.anatolia@yandex.ru](mailto:ryzhkin.anatolia@yandex.ru)

**Fominov, Evgeny V.,**

senior electronic engineer of the Tool Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

[fominoff83@mail.ru](mailto:fominoff83@mail.ru)

**Torop, Yuriy A.,**

senior engineer of the Tool Production Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2722-8107>

[yuriy.torop87@mail.ru](mailto:yuriy.torop87@mail.ru)