

## ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК БЫСТРОРЕЖУЩИМИ СВЕРЛАМИ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

А.С. Куприянова

kupriyanovaas@student.bmstu.ru  
SPIN-код: 3169-0460

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Экономия энергии на промышленных предприятиях является одной из важнейших задач, особенно в настоящее время, поскольку стоимость энергии постоянно растет. Среди затрат на производство продукции, включающих затраты на сырье и материалы, топливо и энергию, заработанную плату, эксплуатационные и прочие расходы, энергетическая составляющая занимает значительную долю. В статье рассмотрены энергозатраты на сверление отверстий в конструкционной стали сверлами из быстрорежущей стали различных марок. При принятых допущениях независимости момента и осевой силы сверления от химического состава режущей части сверла установлено, что использование сверл из инструментальной стали различных марок обуславливает различия в энергопотреблении. Это определяет необходимость правильного выбора инструментального материала при решении задачи оптимизации с позиции экономии энергии.*

### Ключевые слова

*Энергопотребление, износ, режущий инструмент, быстрорежущая сталь, скорость резания, сверло, мощность, момент сверления*

Поступила в редакцию 19.02.2018  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

**Введение.** Промышленные предприятия являются крупнейшими потребителями энергоресурсов, на их долю приходится до 50 % энергопотребления. Поэтому все более актуальной и значимой становится задача экономии потребления энергии. В машиностроении одним из важнейших источников энергопотребления является процесс механической обработки. В ранее проведенных исследованиях выявлена зависимость энергопотребления от многих факторов. Так, в работе [1] выявлена связь между энергопотреблением и площадью поверхности резания при фрезеровании. Установлено, что вне зависимости от способа обработки с увеличением площади поверхности резания энергопотребление устойчиво возрастает. В работе [2] представлен алгоритм выбора режимных параметров минимального энергопотребления при сверлении. Авторами работы [3] установлено, что зависимость энергопотребления от скорости сверления имеет экстремальный характер.

*Цель работы* — исследовать зависимость затрат энергии от марки инструментальной стали при обработке конструкционной стали 45 сверлением.

Эффективность резания может быть оценена различными показателями, такими как стойкость, наработка в пределах стойкости. Для оценки энергопотребления при обработке необходимо учитывать энергозатраты за период стойкости инструмента  $T$ .

Авторами работы [4] выполнены стойкостные испытания сверл из быстрорежущей стали различных марок. Исследование режущих свойств проводили на станках 2А125 и 2А135 при сверлении стали 45 (179 НВ), в заготовках выполняли глухие отверстия глубиной, равной трем диаметрам сверла. Обработку проводили сверлами диаметром  $D = 9,8$  мм, изготовленными из быстрорежущих сталей марок Р18, Р14Ф4, Р6М3 и Р9К10. Сверла затачивали по двум плоскостям с обеспечением следующих значений основных углов:  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\alpha' = 30^\circ$ ,  $2\varphi = 118^\circ$ . Критерием затупления сверл служила максимальная линейная величина износа по задней грани, равная 0,4 мм. Используемый при этом диапазон скоростей резания  $v$  составлял 12...30 м/мин, подача  $S_0 = 0,28$  мм/об. В качестве СОЖ применяли 5 %-ный раствор эмульсола НГЛ-205.

Для повышения достоверности полученных результатов при исследованиях использовали сверла повышенной точности. Сведение до минимума погрешностей изготовления экспериментальных сверл позволяет практически исключить их влияние на стойкость и выделить при исследованиях влияние изучаемых параметров.

В результате исследований установлено, что различный материал режущей части сверл не оказывает заметного влияния на характер стойкостных зависимостей, но определяет интенсивность нарастания линейных величин износа во времени в зависимости от скорости резания.

Стойкость, выраженная в минутах машинного времени, не является достаточно полным показателем работы режущего инструмента, поскольку снижение значений параметров режимов обработки приводит к увеличению стойкости инструмента, в то время как суммарная работа, выполненная инструментом за период стойкости, может сокращаться. Поэтому работу, выполненную инструментом, лучше характеризовать таким показателем, как количество обработанных отверстий  $k$ .

Общая условная длина отверстия  $L$ , мм, обработанного сверлом, составляет

$$L = \frac{1000S_0}{\pi D} vT,$$

где  $T$  — стойкость сверла, мин.

Тогда количество отверстий  $k$ , шт, обработанных сверлом:

$$k = \frac{1000S_0}{\pi D l} vT. \quad (1)$$

Стойкость сверла определяют по формуле

$$T = \frac{k\pi D l}{1000 S_0 v}, \quad (2)$$

где  $l$  — длина обработанного отверстия, мм:

$$l = 3D.$$

Зависимости  $k = f(v)$  имеют вид немонотонно падающих кривых, экстремум которых характеризует диапазон скоростей, обеспечивающих максимальное количество обработанных отверстий.

Для нахождения взаимосвязи между параметрами  $v$  и  $T$  использованы результаты экспериментальных зависимостей  $k = f(v)$ , полученные авторами работы [4] и графически представленные на рис. 1 (на рисунке выделены точки скорости сверления 12,315; 16,317; 23,091, соответствующие числам оборотов сверлильного станка 2А135 400; 530; 750 об/мин).

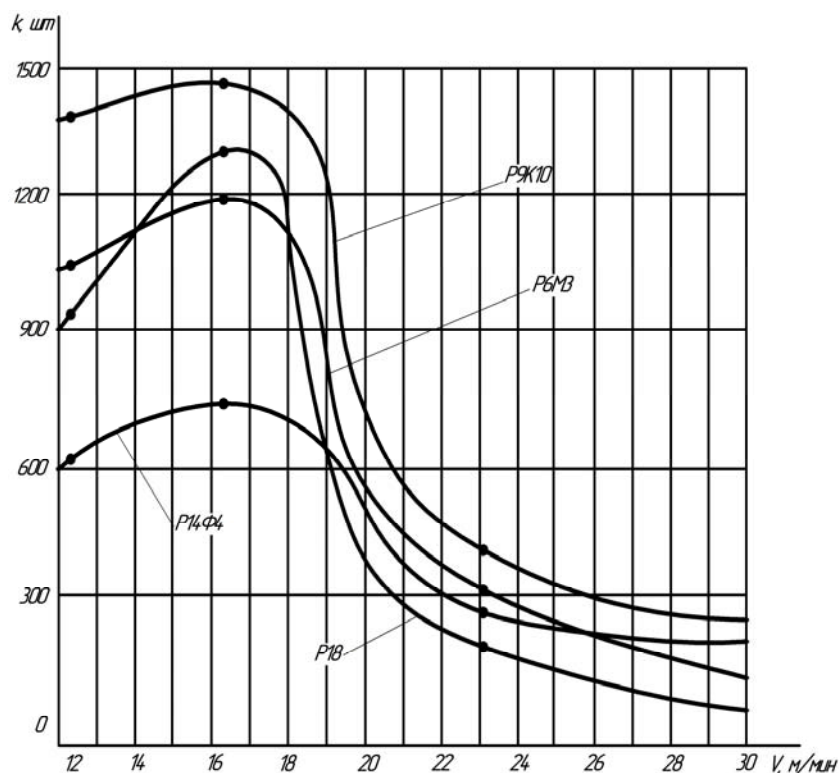
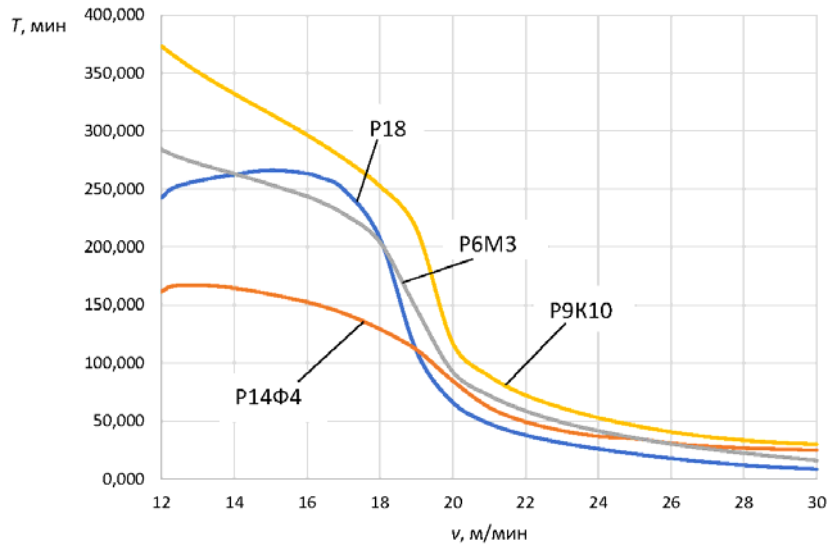


Рис. 1. Графики исходных данных

Стойкость инструмента рассчитана по формуле (2). Зависимости  $T = f(v)$  представлены на рис. 2.

Для аппроксимации использована зависимость вида  $T = av^b e^{cv}$  как наиболее полно описывающая процесс изнашивания. Процесс аппроксимации выполнен с помощью решения систем уравнений, описанных авторами работы [5].



**Рис. 2.** Зависимости стойкости инструмента от скорости резания для исследуемых марок инструментальной стали

Коэффициенты зависимости для инструментальной стали различных марок приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Коэффициенты зависимости  $T = av^b e^{cv}$**

Марка инструментальной стали	Коэффициенты		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
P18	$1,9 \cdot 10^{-5}$	9,9142	-0,6893
P14Ф4	0,2172	4,1849	-0,3155
P6М3	0,0401	5,7266	-0,4472
P9К10	1,0908	4,0233	-0,3469

Зависимости стойкости инструмента от скорости резания для инструментальных сталей исследуемых марок представлены на рис. 3.

Значения *k* вычислены по формуле (1). Зависимости  $k = f(v)$  для исследуемых марок инструментальных сталей, показанные на рис. 4, хорошо соответствуют экспериментальным данным, представленным на рис. 1. Значения погрешности аппроксимации для сталей различных марок приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Погрешность аппроксимации**

Марка инструментальной стали	Погрешность аппроксимации, %
P18	9,53
P14Ф4	8,84
P6М3	9,42
P9К10	7,34

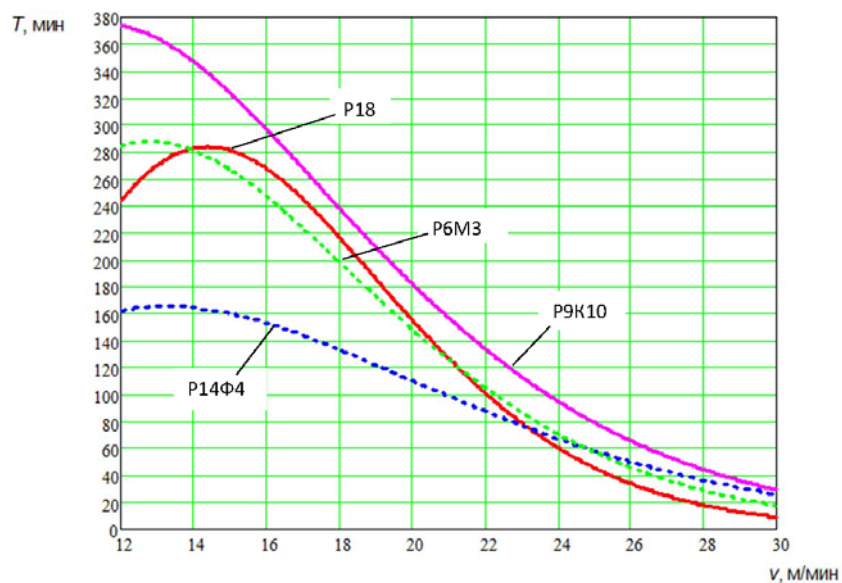


Рис. 3. Зависимости стойкости инструмента от скорости резания, полученные в результате аппроксимации

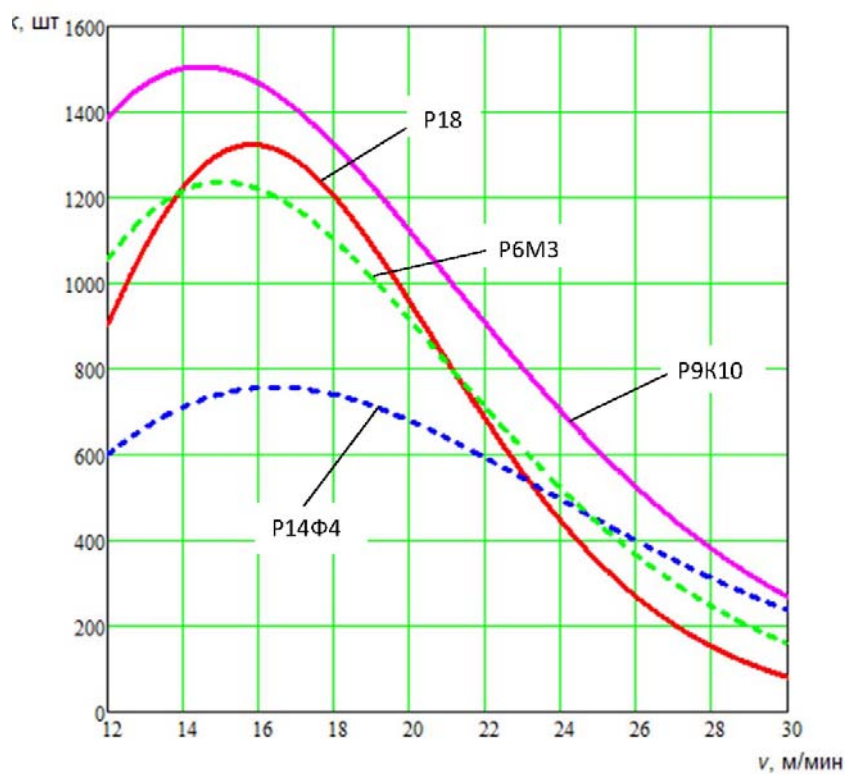


Рис. 4. Зависимости количества обработанных отверстий от скорости резания, полученные в результате аппроксимации

Для расчета энергопотребления необходимо определить значение мощности. Мощность, необходимую для сверления, Вт, определяют как сумму

$$N_{\Sigma} = N_P + N_M.$$

Мощность, необходимая для движения инструмента вдоль оси заготовки, Вт, зависит от осевой силы резания  $P_0$ :

$$N_P = \frac{P_0 v_s}{60 \cdot 1000}.$$

В свою очередь, осевую силу, Н, вычисляют по формуле [6]:

$$P_0 = 904 D S_0^{0,7} \left( \frac{HB}{200} \right)^{0,75}.$$

Скорость подачи сверла, мм/мин, составляет

$$v_s = S_0 n,$$

где  $n$  — частота вращения сверла, об/мин,

$$n = \frac{1000 v}{\pi D}.$$

При рассматриваемых параметрах сверления значение  $P_0 = 3344$  Н постоянно для всех исследуемых инструментальных сталей и во всем диапазоне скоростей.

Мощность, развиваемая моментом резания, Вт, составляет [7]:

$$N_M = \frac{1000 M n}{9750},$$

где  $M$  — момент резания, Н·м [6]:

$$M = 10 C_M D^q S^y K_p.$$

Значения коэффициентов, входящих в эту формулу, приведены в [6, табл. 9, 32]:

$C_M = 0,0345$ ;  $q = 2$ ;  $y = 0,8$ ;  $K_p = \left( \frac{\sigma_B}{750} \right)^{0,75} = \left( \frac{664}{750} \right)^{0,75} = 0,913$ . Значение  $M$  в рассматриваемом случае равно  $10,923$  Н·м.

За время работы в период стойкости с увеличением износа момент резания и осевая сила резания возрастают. Для дальнейших расчетов и оценки относительных энергозатрат процесса сверления инструментом из инструментальной быстрорежущей стали различных марок принимают допущение, что момент резания и осевая сила резания в течение периода стойкости сверла остаются постоянными.

За период стойкости каждое сверло затрачивает различную энергию  $E$ , Вт·ч. Наличие стойкостных зависимостей позволяет рассчитать затраты энергии на обработку сверлами из различных марок инструментальной стали по формуле

$$E = \frac{N_{\Sigma} T}{60}.$$

Зависимости  $E = f(v)$  для инструментальных сталей исследуемых марок представлены на рис. 5.

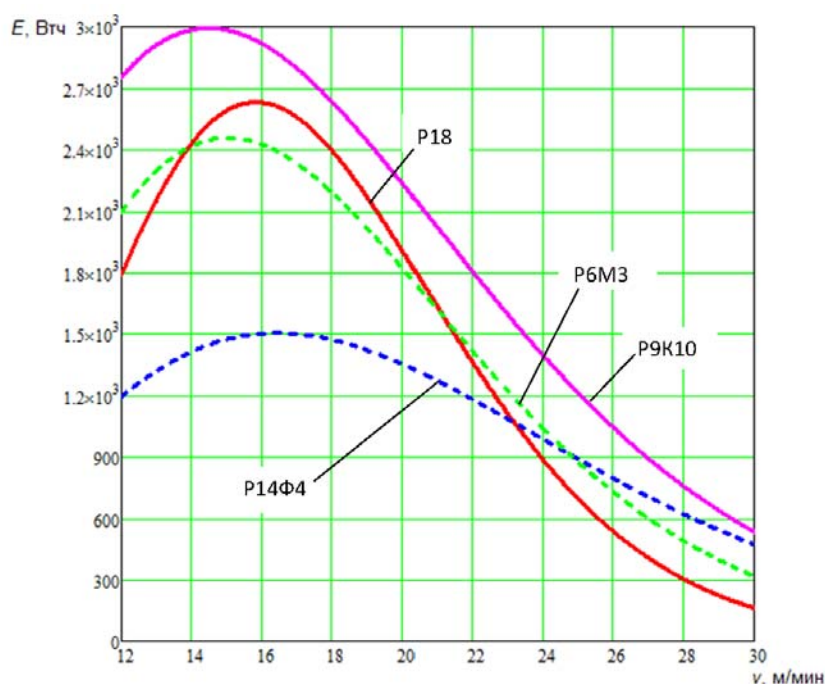


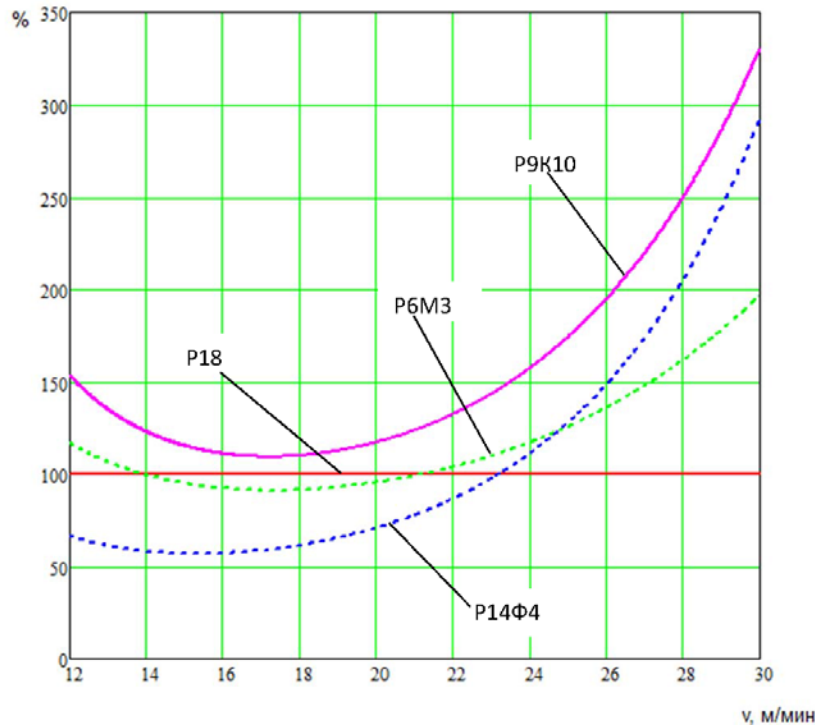
Рис. 5. Зависимость затрат энергии за период стойкости инструмента от скорости резания

Данные по энергозатратам на сверление отверстий в стали 45 за период стойкости сверл, изготовленных из быстрорежущей стали различных марок (P6M3, P9K10, P14Ф4), по отношению к сверлам из стали P18 представлены на рис. 6.

**Заключение.** По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Затраты энергии на обработку отверстий за период стойкости сверл изменяются нелинейно и имеют максимум в диапазоне скоростей 12...18 м/мин.

2. Потребление энергии за период стойкости сверла зависит от скорости резания и марки инструментальной стали, что наряду с другими факторами следует учитывать при назначении скорости резания на стадии проектирования операции сверления.



**Рис. 6.** Зависимости относительного энергопотребления сверл из быстрорежущей стали исследуемых марок по отношению к сверлам из стали P18

3. Для более точных исследований энергопотребления следует отказаться от допущения, что момент резания и осевая сила резания не меняются в ходе износа сверла, и установить влияние износа на момент и осевую силу.

### Литература

- [1] Малькова Л.Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей различными способами фрезерования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1559.html>.
- [2] Щелокова П.Ю., Древаль А.Е. Алгоритм нахождения режимных параметров минимального энергопотребления на примере сверления. *Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2012: Машиностроительные технологии»*. URL: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=571> (дата обращения 24.02.2018).
- [3] Древаль А.Е., Щелокова П.Ю. Энергопотребление при обработке отверстий быстрорежущими сверлами. *Известия ВУЗов. Машиностроение*, 2013, № 12, с. 19–23.
- [4] Даниленко Б.Д., Котликова А.Л., Самсонов В.А., Федотов Н.И. Исследование возможностей повышения режущих свойств спиральных сверл. *Труды МВТУ*, 1975, № 178, с. 39–53.
- [5] Грановский Г.И. *Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1982, 112 с.
- [6] Даниленко Б.Д., Зубков Н.Н. *Выбор режимов резания*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 51 с.



- [7] Косилова А.Г., Мещеряков Р.П. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 1985, 496 с.
- [8] Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов*. Москва, Высшая школа, 1985, 304 с.
- [9] Корчемкин А.Д., ред. *Режимы резания металлов*. Москва, НИИТавтопром, 1995, 456 с.
- [10] Адаменко В.М., Мрочек Ж.А. Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования. *Наука и техника*, 2012, № 4, с. 3–6.

**Куприянова Анастасия Сергеевна** — студентка кафедры «Инструментальная техника и технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Древаль Алексей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**ENERGY CONSUMPTION WHEN PROCESSING  
THE STEEL WORKPIECES WITH FAST-CUTTING DRILLS MADE  
FROM DIFFERENT CHEMICAL COMPOUNDS**

A.S. Kupriyanova

kupriyanovaas@student.bmstu.ru  
SPIN-код: 3169-0460

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

*Energy saving at industrial enterprises is one of the most crucial problems nowadays, since the power cost is constantly increasing. Among the expenditures for products manufacturing including the expenses for raw stores and materials, fuel and energy, earned income, operational and other costs the energy constituent has a considerable proportion. The article considers energy expenditure for drilling holes in the constructional steel with the high-speed steel drills of different marks. Under the assumptions made for the torque and drilling axial force independence from the drill cutting unit chemical composition it has been established that the application of the constructional steel drills of different marks preconditions the differences in energy consumption. It determines the need for the judicious selection of the tooling material when solving the problem of optimization in terms of energy saving.*

**Keywords**

*Energy consumption, wear, cutting tool, high-speed steel, cutting velocity, drill, power, drilling torque*

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

**References**

- [1] Mal'kova L.D. Estimating power consumption for flat surface machining employing various milling techniques. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, no. 12. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/tempp/1559.html>.
- [2] Shchelokova P.Yu., Dreval' A.E. Algoritm nakhozheniya rezhimnykh parametrov minimal'nogo energopotrebleniya na primere sverleniya [Operating parameters algorithm for minimum power consumption as exemplified by drilling]. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Studencheskaya vesna 2012: Mashinostroitel'nye tekhnologii»* [Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf. "Student spring 2012: "Mechanical engineering technologies"]. Available at: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=571> (accessed 24 February 2018).
- [3] Dreval' A.E., Shchelokova P.Yu. Energy consumption in high-speed hole drilling. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2013, no. 12, pp. 19–23.
- [4] Danilenko B.D., Kotlikova A.L., Samsonov V.A., Fedotov N.I. Research on possibilities of improving cutting properties of twist drills. *Trudy MVTU*, 1975, no. 178, pp. 39–53.
- [5] Granovskiy G.I. Obrabotka rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy rezaniya metallov [Experimental data processing of metal cutting research]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 112 p.
- [6] Danilenko B.D., Zubkov N.N. Vybora rezhimov rezaniya [Choice of cutting regime]. Moscow, Bauman Press, 2005, 51 p.

- [7] Kosilova A.G., Meshcheryakov R.P. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. T. 2 [Handbook of mechanic engineer technologist. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 496 p.
- [8] Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. Rezaniye metallov [Metal cutting]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1985, 304 p.
- [9] Korchemkin A.D., ed. Rezhimy rezaniya metallov [Metal cutting regimes]. Moscow, NII-Tavtoprom publ., 1995, 456 p.
- [10] Adamenko V.M., Mrochek Zh.A. Energy efficiency in cutting process of component billet surface on analysis basis for energy-consumption indices of technological equipment. *Nauka i tekhnika* [Science and Technique], 2012, no. 4, pp. 3–6.

**Kupriyanova A.S.** — student, Department of Tool Engineering and Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.E. Dreval, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Tool Engineering and Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.