

УДК 621.9.02

## Энергопотребление при обработке отверстий быстрорежущими сверлами

**А.Е. Древаль, П.Ю. Щелокова**

*Зависимость стойкости инструментов из быстрорежущих сталей от скорости резания носит экстремальный характер. При проектировании операций обработки резанием приходится решать задачи оптимизации по многим критериям. В связи с этим научный и практический интерес представляют изменения энергопотребления процесса обработки с учетом характера изменений стойкости.*

*В статье рассмотрена операция сверления отверстий. Установлено, что функциональному отказу сверла с ростом наработки, проявляющемуся в виде сколов лезвий зубьев или поломок инструмента, предшествует изменение характера динамических показателей сверления. Это проявляется в том, что относительно плавное нарастание момента резания с увеличением наработки прерывается резкими «всплесками» момента сверления, сопоставимыми с моментом прочности инструмента. Значения моментов сверления, при которых происходит изменение характера динамики процесса, зависят от параметров резания, диаметров сверл и свойств обрабатываемого материала и определяются с помощью экспериментально определенного коэффициента  $K$ , устанавливающего взаимосвязь момента разрушения сверла с моментом сверления, предшествующим появлению «всплесков». Разработана частная зависимость коэффициента  $K$  от основных параметров и условий сверления. Установлена связь момента сверления с длительностью наработки инструмента до функционального отказа при различных значениях скорости резания. Это позволяет определять значения мощности сверления в течение обработки и, как следствие, энергопотребление. Установлено, что зависимость энергопотребления от скорости сверления имеет экстремальный характер, при этом скорости резания, при которых наблюдается максимум энергопотребления и максимум наработки, совпадают.*

**Ключевые слова:** режущий инструмент, сверло, скорость резания, износ, момент сверления, мощность, энергопотребление.

## Energy consumption in high-speed hole drilling

**A.E. Dreval', P.Yu. Shchelokova**

*The high-speed steel tool life strongly depends on the cutting speed. The development of cutting operations implies solving multiple-criteria optimization problems. In this context, the dependence of energy consumption on the tool life is of particular scientific and practical interest. This paper deals with hole drilling operations. It has been found that the functional failure of drills manifests itself in the form of tooth or tool damage and is preceded by changing the nature of dynamic drilling parameters. A relatively smooth increase of the cutting torque with operation time is interrupted by abrupt busts of the drilling torque compara-*



**ДРЕВАЛЬ**  
Алексей Евгеньевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**DREVAL'**  
Aleksey Evgen'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**ЩЕЛОКОВА**  
Полина Юрьевна  
(«Второй Московский  
приборостроительный завод»)

**SHCHELOKOVA**  
Polina Yur'evna  
(Moscow, Russian Federation,  
OJSC «Second Moscow  
Instrument Making Plant»)

ble with the ultimate strength of the tool. The values of the drilling torque at which the process character changes depend on cutting parameters, diameters of drills and work material properties. They are determined by the experimental coefficient  $K$  setting up a correspondence between the tool failure torque and the drilling torque preceding abrupt busts. The dependence of the coefficient  $K$  on the main parameters and drilling conditions is established. The relationship between the drilling torque and the tool operation time before failure at different cutting speeds is formulated. This allows determining the drilling power and, consequently, energy consumption. It has been found that the dependence of the energy consumption on the drilling speed is extreme in nature, with the energy consumption and operation time being maximum at the same cutting speed.

**Keywords:** cutting tools, drill, cutting speed, drilling torque, failure torque, tool life, power, energy consumption.

Зависимости стойкости быстрорежущих инструментов при обработке заготовок из конструкционных углеродистых сталей от скорости резания носят экстремальный характер, что подтверждено многочисленными исследованиями, выполненными в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора Г.И. Грановского [1, 2].

Результаты ресурсных испытаний спиральных сверл из быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 10903–77) диаметром  $d = 10,2$  мм при обработке сквозных отверстий глубиной  $3d$  в стали 45 (190 НВ) с подачей  $S = 0,23$  мм/об, СОЖ — 5% раствор эмульсола «Укринол 1» представлены на рис. 1.

Испытания проводились до предельного состояния инструмента (отказа), что проявлялось в виде крупных сколов зубьев или поломках инструмента. В ходе испытаний фиксировалась наработка при одинаковых значениях износа задних поверхностей.

Согласно рис. 1 при прочих равных условиях сверления инструменты, работающие на различных скоростях резания, просверлили до наступления отказа различное количество отверстий. То же наблюдается при достижении сверлами одинаковой величины износа.

В процессе сверления происходит постепенное накопление дефектов на инструменте в виде износа рабочих элементов — ленточек

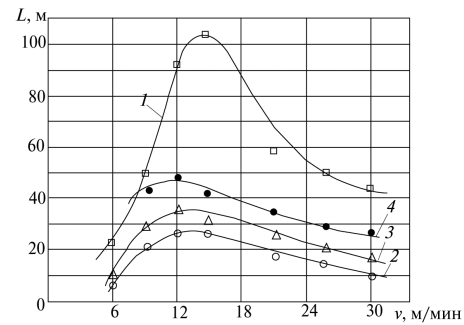


Рис. 1. Зависимость наработки сверл от скорости резания:

1 — при функциональных отказах; 2 —  $h_3 = 0,3$  мм; 3 —  $h_3 = 0,4$  мм; 4 —  $h_3 = 0,5$  мм при критериях равного износа

и задних поверхностей. Изнашивание инструмента сопровождается увеличением момента и осевой силы сверления. При определенном уровне износа изменяются физические условия контакта рабочих поверхностей инструмента и заготовки, которые приводят к резкому возрастанию момента сверления и, как следствие, к отказу инструмента в виде разрушения.

Экспериментальные исследования показывают, что сверла можно эксплуатировать до того значения момента сверления  $M_{рез.доп}$ , которому предшествует появление «всплесков» момента, обусловленных схватыванием изношенных поверхностей инструмента с заготовкой. Достижение состояния схватывания поверхностей ленточек или задних поверхностей с заготовкой происходит с различной интенсивностью, зависящей от скорости резания. В качестве примера на рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости средних значений момента сверления от величины износа при различных скоростях сверления (условия обработки представлены на рис. 2). На монотонно возрастающих зависимостях наблюдаются

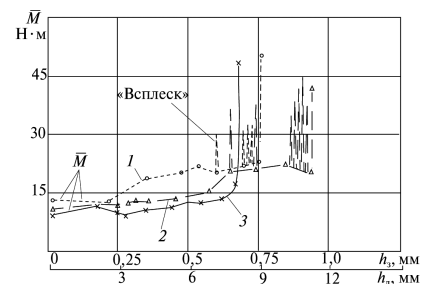


Рис. 2. Зависимость момента резания  $M_{рез}$  от износа задних поверхностей и ленточек сверла при  $S = 0,2$  мм/об;  $d = 10,2$  мм; сталь 45 197–205 НВ: 1 —  $v = 3$  м/мин; 2 —  $v = 7,8$  м/мин; 3 —  $v = 31,2$  м/мин

«всплески» момента сверления, близкие или сопоставимые с моментом прочности инструмента. В статье не рассматриваются физические причины и вклад износа отдельных конструктивных элементов в формирование отказов инструмента в различных диапазонах скорости резания, более подробная информация по этому вопросу представлена в работе [3]. Следовательно, необходимо выдерживать соотношение

$$M_{\text{рез.доп}} \leq M_{\text{разр}} / K, \quad (1)$$

где  $M_{\text{разр}}$  — момент разрушения инструмента;  $K$  — коэффициент, характеризующий соотношение между  $M_{\text{разр}}$  и  $M_{\text{рез.доп}}$  на данном режиме обработки, при котором с учетом износа режущих элементов инструмента проявляются качественные изменения зависимости  $M_{\text{рез}} = f(h)$  — возникают «всплески» момента.

Коэффициент  $K$  является сложной функцией и зависит от большого количества действующих факторов. В первую очередь это: физико-химические свойства контактирующих материалов инструмента и заготовки; параметры режима резания; геометрические особенности режущих лезвий, которые определяют энергетическое состояние в зоне резания.

С учетом большого количества действующих факторов для расчета коэффициента  $K$  принят эмпирический подход, заключающийся в том, что для определенного класса обрабатываемых материалов экспериментально установлены частные зависимости  $K$  от основных параметров сверления. Зависимости  $K$  от значений диаметра сверл, скорости и подачи при сверлении, твердости заготовки представлены на рис. 3. Эксперименты при сверлении стали 45 твердостью 197–205 НВ проводились до поломки сверл, каждый опыт повторялся не менее 3 раз.

Общая зависимость коэффициента  $K$  от указанных параметров, установленная на основе частных, имеет вид

$$K = 3,833 \cdot 10^{-1} v^{0,2492} S^{-0,8331} d^{0,304} \text{HB}^{0,0924}. \quad (2)$$

Результаты расчета коэффициента  $K$  для условий сверления, соответствующих представленным выше и на рис. 1, отражены в сводной таблице. По значению коэффициента  $K$  можно определить момент и мощность резания, которые предшествуют наступлению функционального отказа сверла при конкретном значении скорости резания.

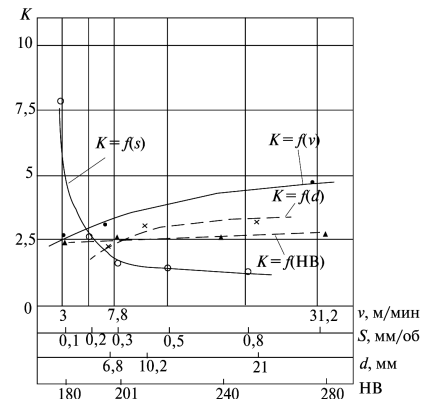


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $K = M_{\text{разр}} / M_{\text{рез.доп}}$  от основных параметров процесса сверления

Автор работы [4] на основании анализа большого числа расчетных моделей моментов разрушения  $M_{\text{разр}}$  и осевой силы разрушения  $P_{\text{разр}}$  доказывает, что сверла соответствующие ГОСТу, имеющие нормальный вылет, разрушаются под действием крутящего момента, кгс/мм, который может быть определен по формуле

$$M_{\text{разр}} = 0,026 \cdot 10^{1,4m + 0,2n} \tau_{\text{max}} q^3, \quad (3)$$

где  $m$  — безразмерный параметр, учитывающий отношение диаметра сердцевины сверла  $k$  к его диаметру  $d$ ,  $m = k/d$ ;  $n$  — безразмерный параметр, учитывающий отношение ширины зуба в сечении, перпендикулярном винтовой линии сверла  $B$  к его диаметру,  $n = B/d$ ;  $\tau_{\text{max}}$  — предел хрупкой прочности быстрорежущей стали сверла,  $\tau_{\text{max}} = 155 \dots 175$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $q$  — диаметр спинки сверла.

Для сверла диаметром  $d = 10,2$  мм с учетом интервала значений  $\tau$  момент разрушения  $M_{\text{разр}} = 69,6 \dots 78,6$  Н·м. Приведенные ниже расчеты выполнены для среднего значения  $M_{\text{разр}} = 74,1$  Н·м.

Таким образом, зависимости (1)–(3) позволяют установить момент сверления  $M_{\text{разр. доп}}$ , предшествующий разрушению инструмента, в зависимости от скорости резания.

При анализе энергопотребления при сверлении принято, что скорость резания не оказывает существенного влияния на величину момента сверления при использовании острозаточенных сверл (не изношенных). Правомерность этого положения подтверждается экспериментально. На рисунке 2 видно, что первоначальные значения моментов резания при сверлении с различными скоростями достаточно близки. Этот факт отражен в нормативах режимов реза-

ния, в базовых расчетных зависимостях которых момент сверления функционально не связан со скоростью резания. Одновременно скорость резания оказывает влияние на интенсивность и характер изнашивания рабочих элементов инструмента и, как следствие, на скорость увеличения момента сверления.

При расчете энергетических показателей при сверлении принято, что момент сверления по мере накопления износа рабочих элементов сверла возрастает по линейной зависимости. Это подтверждается специально выполненными лабораторными экспериментами с использованием сверл диаметрами 6,8; 10,2; 21 мм по установлению зависимости увеличения моментов сверления по мере увеличения износа задних поверхностей и ленточек сверл (см. рис. 2). Представленные данные показывают, что средние значения моментов резания монотонно возрастают с увеличением износа и могут быть аппроксимированы с достаточной точностью прямой линией на участках до появления «всплесков» момента.

С учетом линейного характера зависимостей  $M_{рез} = f(h)$ , Н·м/мин, скорость увеличения момента сверления

$$v_{изн} = \Delta M_{рез i} / t,$$

где  $\Delta M_{рез i}$  — приращение момента сверления от начального  $M_0$  до предельного значения (при отказе)  $M_{рез. доп}$ ,  $\Delta M_{рез} = M_{рез. доп} - M_0$ ;  $t$  — время работы сверла, мин.

Результаты экспериментального исследования наработки сверл (см. рис. 1) позволяют определить время работы сверл  $t$  до предельного

состояния в диапазоне скоростей резания от 5 до 30 м/мин по формуле

$$t = \frac{1000L}{S_0 n} = \frac{\pi d L}{S_0 v}.$$

Результаты расчетов представлены в сводной таблице.

Мощность процесса сверления в конкретный момент времени  $t$  с учетом возрастания момента резания вследствие износа рассчитывается по формуле

$$N_i = \frac{M_i n}{9556} = \frac{(M_0 + v_{изн i} t) n}{9556} = \frac{(M_0 + v_{изн i} t) \frac{1000v}{\pi d}}{9556} = \frac{(M_0 + v_{изн i} t) \cdot 1000v}{9556 \pi d}.$$

Затраты энергии на процесс сверления

$$E = \frac{1}{60} \int_0^t N_i dt = \frac{1}{60} \int_0^t \frac{(M_0 + v_{изн i} t) \cdot 1000v}{9556 \pi d} dt = \frac{1}{60} \frac{1000v}{9556 \pi d} \int_0^t (M_0 + v_{изн i} t) dt = \frac{1}{60} \frac{1000v}{9556 \pi d} \left( M_0 t + v_{изн i} \frac{t^2}{2} \right) \Bigg|_0^t.$$

Результаты расчета энергозатрат на процесс сверления на различных скоростях на примере сверления отверстий (см. рис. 1) представлены в сводной таблице. В сводной таблице приведены результаты расчета энергопотребления при эксплуатации сверл до наступления функционального отказа. Аналогичные расчеты, выполненные при наработке сверл до достижения изно-

Сводная таблица расчета энергопотребления

Характеристика	Значение						
	6	9	12	15	21	25,8	30
Скорость резания $v$ , м/мин	6	9	12	15	21	25,8	30
Нарботка $L$ , м	22	48	82	104	60	50	43
Время работы $t$ , мин	510,6	742,7	951,6	965,5	397,9	269,9	199,6
Расчетное значение коэффициента $K$	2,417	2,674	2,873	3,037	3,302	3,476	3,609
Расчетное значение $M_{рез. доп}$ , Н·м	30,659	27,713	25,796	24,400	22,438	21,316	20,530
Начальное значение $M_0$ , Н·м	11,116						
Прирост $\Delta M$ , Н·м	2,758	2,493	2,320	2,195	2,018	1,918	1,847
Скорость нарастания момента $v_{изн}$ , Н·м/мин	0,005939	0,005368	0,004997	0,004726	0,004346	0,004129	0,003977
Мощность процесса сверления $N$ , кВт	0,277	0,444	0,622	0,768	0,881	1,031	1,167
Энергопотребление $E$ , кВт·ч	2,106	4,770	8,387	10,561	5,449	4,424	3,752

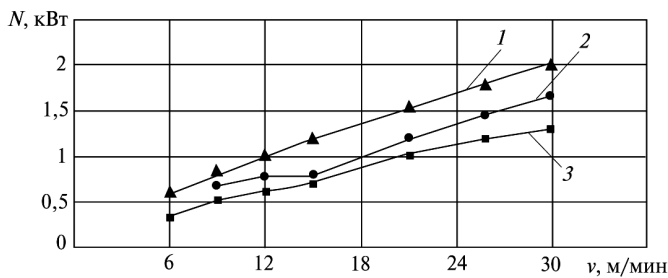


Рис. 4. Зависимость мощности сверления от скорости резания при достижении:

1 — функционального износа; 2 — равного износа  $h_3 = 0,5$  мм; 3 — равного износа  $h_3 = 0,3$  мм

са задних поверхностей до величин равного износа (см. рис. 1), представлены на рис. 4 и рис. 5.

## Выводы

1. При сверлении отверстий в конструкционных сталях в диапазоне скоростей резания 6...30 м/мин с ростом наработки изменяется характер динамики процесса. Относительно монотонное нарастание момента сверления при определенных значениях износа инструмента ограничено возникновением резких «всплесков» моментов сверления, приводящих к функциональным отказам в виде разрушения рабочих элементов или сверла в целом.

2. Установлено, что соотношение между моментом сверления, предшествующим возникновению «всплесков», и моментом разрушения сверла зависит от конструктивных размеров, параметров режима резания и условий и материала заготовки. Предложена эмпирическая зависимость для определения коэффициента, характеризующего это соотношение.

3. Мощность процесса при наступлении функциональных отказов и при сверлении до достижения равного износа задних поверхностей возрастает по линейной зависимости от скорости резания.

4. Энергопотребление при сверлении имеет нелинейный экстремальный характер в зависи-

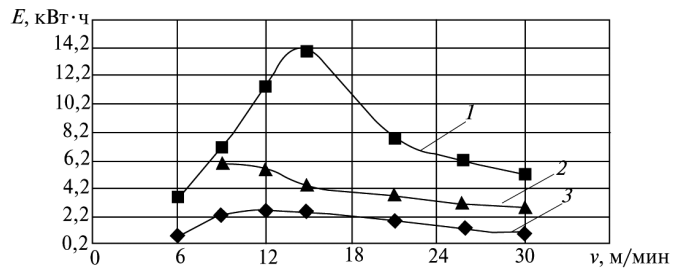


Рис. 5. Зависимость энергопотребления от скорости резания при наработке:

1 — до функционального износа; 2 — до равного износа  $h_3 = 0,5$  мм; 3 — до равного износа  $h_3 = 0,3$  мм

мости от скорости резания. Максимальные значения энергопотребления соответствуют значениям скоростей резания максимальной наработки. Изменения величин допустимого износа сверл оказывает существенное влияние на наработку и энергопотребление.

## Литература

- [1] Резание и инструмент. *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*. Москва, 1975, № 178, 161 с.
- [2] Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов*. Москва, Высшая школа, 1985, 304 с.
- [3] Древал А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях массового производства. *Электронный научно-технический журнал*. Режим доступа: <http://tecnomag.edu.ru/doc/250866> (дата обращения 26 августа 2013).
- [4] Жилис В.И. *Исследование некоторых вопросов прочности спиральных сверл различных конструкций*. Вильнюс, ЛитНИИТИ, 1967, 70 с.

## References

- [1] *Rezanie i instrument* [Cutting and tool]. *Trudy MVTU im. N.E. Baumana* [Proceedings of the Bauman Moscow State Technical University]. Moscow, 1975, no. 178, 161 p.
- [2] Granovskii G.I., Granovskii V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow, Vysshiaia shkola publ., 1985. 304 p.
- [3] Dreval' A.E., Ragrin N.A., Samsonov V.A. Formirovanie otkazov spiral'nykh sverl v usloviakh massovogo proizvodstva [Spiral Drills Failure Generation in Automated Operation]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. Available at: <http://tecnomag.edu.ru/doc/250866.html> (accessed 26 August 2013).
- [4] Zhilis V.I. *Issledovanie nekotorykh voprosov prochnosti spiral'nykh sverl razlichnykh konstruktssii* [A study of some problems of strength of twist drills of various designs]. Vil'nius, LitNIINTI publ., 1967. 70 p.

Статья поступила в редакцию 28.08.2013

## Информация об авторах

**ДРЕВАЛЬ Алексей Евгеньевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dreval\_a@mail.ru).

**ЩЕЛОКОВА Полина Юрьевна** (Москва) — инженер ОАО «Второй Московский приборостроительный завод» (101000, Москва, Российская Федерация, Россолимо ул., д. 17).

## Information about the authors

**DREVAL' Aleksey Evgen'evich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Instrumental Technique and Technology» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: dreval\_a@mail.ru).

**SHCHELOKOVA Polina Yur'evna** (Moscow) — Engineer of OJSC «Second Moscow Instrument Making Plant» (Rossolimo str., 17, 101000, Moscow, Russian Federation).