

УДК 621.941

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Канд. техн. наук АДАМЕНКО В. М.<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. МРОЧЕК Ж. А.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>*Борисовский государственный политехнический колледж,*

<sup>2)</sup>*Белорусский национальный технический университет*

Качество продукции современного машиностроения играет решающую роль не только для развития промышленности, но и при формировании инновационного творчества специалистов, стремящихся к достижению мирового уровня выпуска продукции. Следует отметить, что в настоящее время проектная достижимость качества изделий составляет 70–80 % [1], поэтому актуальность технологических инноваций возрастает и приобретает системный подход в прикладных исследованиях. Качество при производстве продукции рассматривается как степень приближения к выполнению требований, предъявляемых к изделию заказчиком или потребителем. При этом технологическое проектирование качества изделий на всех стадиях жизненного цикла изделия характеризуется как проблема весьма важная.

В то же время процесс изготовления продукции должен обеспечить высокие требования к точности, которая характеризуется степенью приближения к выполнению требований, предъявляемых к изделию конструкторским чертежом. В связи с этим компетентность и профессиональные навыки специалиста играют важную роль в разработке энергоэффективного процесса механической обработки поверхностей деталей.

Величина энергоресурсов в составляющей машиностроительной продукции оценивается

в пределах 12–18 %, а тенденция снижения указанного показателя с каждым годом более актуализируется [2].

В настоящее время для оценки энергоэффективности технологического процесса по энергопотреблению используются различные методики [3–5]:

- оценка маршрутно-операционного технологического процесса в целом;
- оценка отдельной операции;
- оценка по рабочим характеристикам привода главного движения (мощность, КПД,  $\cos\varphi$ ).

В качестве критериев для оценки энергоэффективности процесса обработки лезвийным инструментом заготовок из конструкционных сталей принимались: оптимальная скорость резания ( $v_0$ ); показатель рабочих характеристик привода главного движения; мощность электродвигателя ( $N$ ); коэффициент полезного действия КПД ( $\eta$ ); коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ) и удельная энергоёмкость процесса ( $\beta$ ).

В качестве критерия оптимальности использована удельная энергоёмкость процесса резания (затраты энергии, приведенные к единице объема материала).

Расчет удельной энергоёмкости  $\beta$  осуществляется по зависимости

$$\beta = \frac{N_{\text{расч}}}{v_0 St}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{расч}}$  – расчетная мощность резания, кВт;  $v_3$  – энергоэффективная скорость резания, м/мин;  $S$  – скорость подачи, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм.

Понятие «энергоэффективная скорость резания» отражает энергетическую составляющую процесса резания и рассматривается с позиции, при которой съем металла достигается при минимальных затратах энергии и соответствующей скорости резания. Отношение  $\frac{N_{\text{расч}}}{v_3}$

характеризует принцип минимума энергии, затрачиваемой на процесс резания, и имеет практическую ценность.

Использование принципа минимума энергии для работы, затрачиваемой при резании, характеризуется критерием оптимизации процесса резания и определяет его удельную энергоемкость. Удельная энергоемкость как критерий оптимальности отражает энергетическую сторону процесса резания. Положительные стороны критерия заключаются в возможности его математического расчета. Назначенные параметры обработки при минимизации удельной энергоемкости обеспечивают режим повышенной производительности, поэтому ее целесообразно использовать для выбора операций обработки, в частности для предварительных операций [6].

Следует учитывать, что удельная энергоемкость, характеризуя физико-механическое состояние зоны резания, служит показателем эффективности съема материала и определяет условия работы режущего инструмента. С помощью удельной энергоемкости оптимизируют физические условия резания, а экономическая сторона процесса может быть отражена в соответствующих ограничениях на оптимизируемые параметры. Удельная энергоемкость является универсальным критерием, величина которого зависит от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента и режима резания и не зависит от характера производства (в отличие от экономических критериев). Целесообразность использования удельной энергоемкости очевидна при оптимизации условий резания, когда экстремумы экономических критериев находятся на границе области допустимых величин оптимизируемых параметров.

В этом случае процессы можно выстраивать в определенную систему в координатах «удельная энергоемкость – скорость резания», «удельная энергоемкость – производительность процесса».

На основании результатов проведенного анализа были сформулированы основные положения технологического процесса резания:

- оптимальным удельной энергоемкости процесса и скоростям резания (для используемого материала режущей части инструмента) при различных комбинациях скорости, подачи и глубины резания соответствует максимальная величина  $\cos\varphi$  электродвигателя главного привода;

- оптимальная удельная энергоемкость процесса определяется из зависимости

$$\beta_0 = \frac{N_{a \cos\varphi \max}}{v_0 \cos\varphi \max S t}, \quad (2)$$

где  $N_{a \cos\varphi \max}$  – расчетная активная мощность процесса резания при максимальной величине  $\cos\varphi$ , кВт;  $v_0$  – оптимальная скорость резания, м/мин;  $S$  – скорость подачи, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;

- в качестве критерия адаптивного управления процессом обработки при различных скоростях, подачах и глубинах резания целесообразно использовать максимальную величину  $\cos\varphi$  электродвигателя главного привода и скорости резания (табл. 1–3).

В процессе исследований проводились расчет мощности и определение  $\cos\varphi$  на разных скоростях резания, расчет удельной энергоемкости процесса  $\beta$  и определение оптимальной скорости резания.

Известно, что коэффициент мощности электродвигателя главного привода технологической системы резания является функционально зависимой величиной от действующих сил резания. Его максимальные значения, например для черного и чистового точения, будут различными величинами [7].

В области энергосберегающих скоростей резания, допускаемых мощностью главного привода (рис. 1), были выбраны параметры процесса резания образцов из стали 45 при  $t = 2,50$  мм;  $S = 1,14$  мм/об и диапазоне скоростей  $v = 120$ – $175$  м/мин. Изменение скорости резания осуществляли варьированием частоты вращения заготовки. В указанном диапазоне через каждые 10–15 м/мин отбирались образцы стружек (время

резания  $t_p$  на каждой скорости не более 30 с). Измерялись мощность, сила тока, напряжение и определялся  $\cos\varphi$  по зависимости

$$\cos\varphi = \frac{N}{3UI}, \quad (3)$$

где  $N$  – мощность в технологической системе резания, кВт;  $U$  – напряжение, В;  $I$  – ток, А.

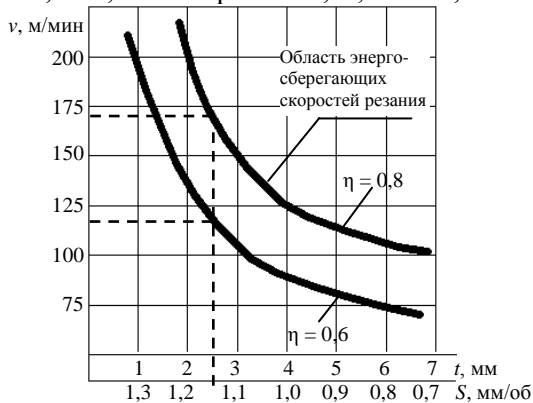


Рис. 1. Зависимость скорости резания от КПД электродвигателя привода главного движения при различных режимах обработки

Затем строились зависимости  $N = f(v, \cos\varphi)$ ,  $\beta = f(\cos\varphi)$  (рис. 2). Визуальным осмотром (контролем) прирезочной поверхности стружки при максимальном значении  $\cos\varphi$  устанавливали оптимальную скорость резания  $v_o$  (отсутствие задигов, наростообразования, налипов).

Анализ результатов показывает, что при повышении скорости резания от 90 до 170 м/мин происходит увеличение  $\cos\varphi$  от 0,71 до 0,91, что приводит к наиболее высоким показателям использования энергии привода главного движения станка. Дальнейшее повышение скорости резания от 170 до 200 м/мин увеличивает  $\cos\varphi$  от 0,91 до 0,94, и наблюдается перегрузка электродвигателя. Таким образом, подтверждается соответствие величины  $\cos\varphi$  0,91 при оп-

тимальной скорости резания. Было установлено, что скорость резания для выбранных условий обработки составляет 150–151 м/мин, при которой мощность привода главного движения используется наиболее оптимально, что подтверждается стойкостными испытаниями.

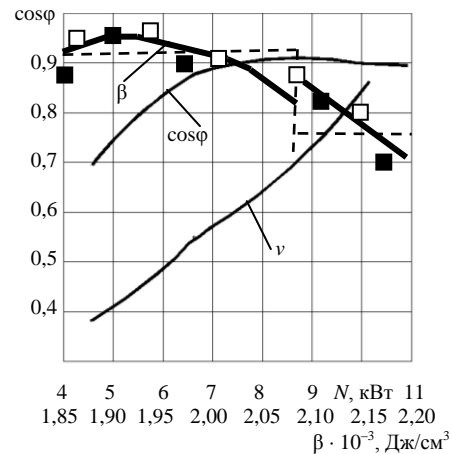


Рис. 2. Зависимость скорости резания от мощности электродвигателя привода главного движения и  $\cos\varphi$ , удельной энергоёмкости  $\beta$  и  $\cos\varphi$  (□ – для образцов  $D_{\text{заг}} = 32$  мм, ■ – для образцов  $D_{\text{заг}} = 36$  мм)

Аналитический расчет оптимальной удельной энергоёмкости (2) показал: при  $v_o = 151$  м/мин;  $\cos\varphi = 0,91$ ;  $N_a = 8,64$  кВт значение  $\beta_o = (2,03 \cdot 10^{-3})$  Дж/см<sup>3</sup>, что соответствует скорости резания 125–135 м/мин и подтверждает вывод о предпочтительности критерия  $\cos\varphi$  как показателя энергоэффективности технологической системы резания, использование которого повышает эффективность обработки на 12–14 %.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ (рис. 1, 2; табл. 1, 2) подтверждают возможность использования энергетических показателей электродвигателя привода главного движения при определении оптимальной скорости резания.

Таблица 1

Технологическая характеристика скоростей резания

Номер варианта	Характеристики скорости резания, допускаемой режущими свойствами инструмента							Характеристики скорости резания, допускаемой мощностью электродвигателя главного движения						
	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$v$ , м/мин	$D_{\text{заг}}$ , мм	Параметры шероховатости, мкм	$t_p$ , с	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$N$ , кВт	$\eta$	$v$ , м/мин		
1	1	1,40	2000	201	32	3,2	30	1	1,3	10	0,6	228		
2	2	1,21	1600	161				2	1,3			142		
3	3	1,14	1250	126				3	1,1			108		
4	4	1,04	1000	100				4	1,0			90		
5	5	0,95	800	80		5		0,9	82					
6	6	0,87	600	63		6		0,8	78					
7	1	1,40	2000	226		36		3,2	1			1,3	0,8	341
8	2	1,21	1600	181					2			1,2		200

9	3	1,14	1250	141	6,3	3	1,1	151
10	4	1,04	1000	113		4	1,0	
11	5	0,95	800	90		5	0,9	
12	6	0,87	600	71		6	0,8	

Таблица 2

Влияние режимов резания на изменение коэффициента мощности и удельной энергоёмкости

Номер варианта	Параметры														
	исходные					измеряемые					расчетные				
	$n, \text{мин}^{-1}$	$t, \text{мм}$	$S, \text{мм/об}$	$v, \text{м/мин}$	$D_{\text{заг}}, \text{мм}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$P_{\text{изм}}, \text{кВт}$	$t_p, \text{с}$	$R_a, \text{мкм}$	$v, \text{м/мин}$	$P_H, \text{Н}$	$N, \text{кВт}$	$\cos\varphi$	$\beta \cdot 10^{-3}, \text{Дж/см}^3$
1	630	2,5	1,14	71	36	6,2	380	4,08	20	6,3	71	3729	4,41	0,646	2,18
2	800			90		7,3		4,08			90	3602	5,40	0,760	2,11
3	1000			113		7,9		5,20			113	3482	6,56	0,823	2,04
4	1250			141		8,6		5,66			141	3368	7,92	0,896	1,97
5	1600			180		8,8		5,79			180	3248	9,74	0,917	1,89
6	2000			225		8,6		5,66			225	3142	11,78	0,896	1,84
1	630	2,5	1,14	63	32	5,9	380	3,88	30	6,3	63	3799	3,99	0,614	2,22
2	800			90		7,0		4,61			80	3665	4,89	0,729	2,14
3	1000			100		7,8		5,13			100	3545	5,91	0,813	2,07
4	1250			125		8,6		5,66			125	3432	7,15	0,896	2,00
5	1600			160		8,9		5,86			160	3305	8,81	0,927	1,93
6	2000			200		8,7		5,73			200	3198	10,65	0,906	1,86

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждена взаимосвязь максимальной величины  $\cos\varphi$  и минимальной удельной энергоёмкости  $\beta$ .

2. Предложенный способ можно рекомендовать для практического использования при проектировании оптимальных и энергосберегающих технологий (в первом приближении) для всех металлов и сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гличев, А. В. Основы управления качеством продукции / А. В. Гличев. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2003. – 424 с.  
 2. Мрочек, Ж. А. Оптимизация параметров формообразования поверхностей резанием по энергопотребляющим показателям технологического оборудования / Ж. А. Мрочек, В. М. Адаменко, Д. В. Адаменко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2007. – С. 54–57.

3. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие для вузов / И. П. Филонов [и др.]; под общ. ред. И. П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2003. – 910 с.

4. Адаменко, В. М. Теоретические предпосылки оптимизации процесса резания по энергопотребляющим показателям технологического оборудования // Машиностроение: сб. науч. трудов; под ред. И. П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2001. – Вып. 17. – 398 с.

5. Каштальян, И. А. Оценка и выбор критериев оптимальности для задач управления нестационарными процессами резания на станках с ЧПУ / И. А. Каштальян // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2002. – № 4. – С. 32–36.

6. Старков, В. К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984.

7. Данилов, И. А. Общая электротехника с основами электроники: учеб. пособие для неэлектрических специальностей техникумов / И. А. Данилов, П. М. Иванов. – М.: Высш. шк., 1989. – 752 с.

Поступила 22.11.2011