

---

*Научная статья*

**УДК 621.9**

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 57–65.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 57–65.

**Л.Д. Малькова**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКОСТЕЙ**

### **Аннотация**

На основании выявленной ранее гипотезы о зависимости энергопотребления от площади поверхности резания, подтвержденной на торцовом и цилиндрическом фрезеровании, проведен совокупный математический анализ результатов по четырем способам обработки. Представлены результаты экспериментальных исследований и аналитических расчетов энергопотребления при строгании и протягивании плоскости, выполненных для условий, аналогичных фрезерованию. Определены площади поверхности резания, формируемые режущим лезвием инструментов для указанных условий обработки. Установлено и математически подтверждено, что выявленная гипотеза может быть обобщена на способы обработки с различными кинематическими схемами, но с аналогичными условиями резания.

**Ключевые слова:** энергопотребление, механическая обработка, сила резания, строгание, протягивание

**Для цитирования:** Малькова Л.Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 57–65.

**L.D. Malkova**

Bauman Moscow State Technical University

## **ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION DURING MACHINING OF PLANES**

### **Abstract**

Based on the previously identified hypothesis about the dependence of energy consumption on the area of the cutting surface, confirmed by end and cylindrical milling, a cumulative mathematical analysis of the results for four processing methods was carried out. The results of experimental studies and analytical calculations of energy consumption during planning and broaching of the plane, performed for conditions similar to milling, are presented. The cutting surface areas formed by the cutting blade of the tools for the specified processing conditions are determined. It has been established and mathematically confirmed that the revealed hypothesis can be generalized to processing methods with different kinematic schemes, but with similar cutting conditions.

**Keywords:** energy consumption, mechanical processing, cutting force, planing, broaching

**For citation:** Malkova L.D. Estimation of energy consumption during machining of planes. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 57–65. (In Russian)

## Введение

Обеспечение эффективности современного производства – задача многоплановая, включающая в себя десятки показателей, совокупность которых формирует соответствующие критерии оценки. Указанные критерии часто противоречат друг другу. Например, рост производительности и снижение себестоимости обычно имеют разнонаправленные тенденции изменения. Поэтому достижение целевой функции обеспечения эффективности производства является оптимационной задачей, в которой значимость каждого из критериев оптимизации задает конкретная производственная, экономическая, социальная или иная ситуация.

Одной из важнейших составляющих целого ряда критериев, а иногда и самостоятельным критерием, является энергетическая эффективность. В федеральном законе № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» это понятие определяется как характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.

Технологические процессы, являющиеся самостоятельным объектом обеспечения энергетической эффективности, требуют решения задачи энергосбережения, что, в соответствие № 261-ФЗ, является реализацией организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг).

Область механической обработки относится к группе технологических мер. Поэтому вопросы оценки и, как следствия, управления энергопотреблением при обработке резанием являются актуальными.

## Постановка задачи

Вопросы энергосбережения в производственных процессах в целом и при механической обработке в частности рассматриваются исследователями с разных сторон. Разрабатываются и внедряются

системные подходы [1, 2], проводятся оптимизация работы металлорежущего оборудования для локальных задач [3], разрабатываются методики использования безразмерных показателей энергетической эффективности [4–6] и т.д. Но все-таки большинство авторов опираются на модели силовых характеристик процессов механической обработки, рассматривая снижение силы резания как основу энергосбережения. Определение составляющих силы резания проводится исследователями на основе теоретических положений и схем, например, для сложных поверхностей [7–11], или на основе математических моделей, полученных экспериментально. В случае использования степенных зависимостей их точность повышается за счет увеличения количества замеров и введение дополнительных коэффициентов [12]. А для полиномиальных моделей большое значение имеет корректность факторов, составленных планов и последующей обработки результатов.

Хотя сила резания в определении энергопотребления играет существенную роль, прямой зависимости между ними не существует, т.к. изменение силы резания, связанное с параметрами режима обработки, приводит к соответствующему изменению основного технологического времени. Указанные тенденции часто носят разнонаправленный характер. Поэтому существует еще один сегмент в исследованиях по энергосбережению в механической обработке – это выявление наиболее эффективных технологических цепочек, в русле которых и выполнена данная работа.

Прямое измерение расхода электрической энергии, как и потребляемой мощности, при механической обработке весьма затруднительно. Контролирующие приборы обычно устанавливаются таким образом, что на их показания оказывает влияние не только полезная энергия, идущая на срезание припуска, но и обеспечение работы всех узлов станка на холостом ходу, и дополнительные потери. Поэтому наиболее точно полезную энергию можно определить через контроль составляющих силы резания и последующем пересчете по формуле:

$$E = P_z \cdot v \cdot t_o = P_z \cdot v \cdot \frac{L}{1000 \cdot v} = \frac{P_z \cdot L}{1000}, \quad (1)$$

где  $E$  – потребляемая энергия, Дж,  $P_z$  – главная составляющая силы резания, Н,  $v$  – скорость резания, м/мин,  $L$  – длина обработки, мм,  $t_o$  – основное технологическое время, мин.

В работе [13] была выдвинута гипотеза о корреляции между потребляемой энергией на обработку заданной поверхности и площадью поверхности резания, которую формирует режущее лезвие инструмента в процессе указанной обработки. Гипотеза была проверена экспериментально и подтверждена для двух способов фрезерования плоской открытой поверхности – торцового и цилиндрического. Эксперименты были проведены при следующих условиях: скорость резания  $v = 25$  м/мин, подачи на зуб  $S_z = 0,05; 0,062; 0,08; 0,1$  мм/зуб, глубина резания  $t = 1$  мм, ширина фрезерования  $B = 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24; 27$  мм.

На данном этапе исследования ставится задача расширения способов обработки, приведенных к той же самой поверхности, но имеющих иную кинематическую схему. В частности, следует рассмотреть строгание открытой плоскости, имеющее прямолинейное главное движение резания и движение подачи на двойной ход, и протягивание, работающее только с прямолинейным главным движением резания. Расчет площади поверхности резания при указанных кинематических схемах в корне отличается от расчетов при фрезеровании, что позволит считать возможную корреляцию общим случаем, не зависимым от схемы снятия припуска.

Для обеспечения сопоставимости условий разных способов обработки следует учесть следующие аспекты:

- использование одной и той же заготовки (сталь 45, 200 НВ),
- использование одних и тех же блоков контрольно-измерительной аппаратуры для фиксирования и регистрации силовых характеристик процесса резания,
- использование инструментов из одного и того же инструментального материала (сталь Р6М5 ГОСТ 18887-73) с одинаковыми элементами режущего лезвия ( $\alpha = 9^\circ, \gamma = 4^\circ$ ),
- проведение замеров при близких значениях скорости резания  $v$  и одинаковых значениях глубины резания  $t$ ,
- совпадение длины и ширины обрабатываемой плоскости.

### Определение энергопотребления при строгании

Для определения главной составляющей силы резания при строгании и последующем расчете энергопотребления для данного способа обработки собрана динамометрическая установка, включающая поперечно-строгальный станок модели 7Б35, динамометр Kistler 9257B, усилитель преобразователь 5070A Kistler и блок АЦП 5697 Kistler. В качестве инструмента использовались строгальные резцы с главными углами в плане  $\varphi = 15^\circ$  и  $45^\circ$  и вспомогательными углами в плане  $\varphi' = 32^\circ$  и  $15^\circ$  соответственно, что позволило расширить диапазон значений площади поверхности резания. Скорость резания составила  $v = 24,8$  м/мин при следующих назначенных подачах на двойной ход:  $S_{\text{дв х}} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$  мм/дв.х. Остальные условия эксперимента в полной мере соответствовали перечисленным ранее требованиям сопоставимости.

На рис. 1 представлен эскиз обработки при строгании, а на рис. 2 элемент графика регистрируемой составляющей силы резания  $P_z$  (в частности, при строгании с параметрами  $\varphi = 15^\circ$  и  $S_{\text{дв х}} = 0,4$  мм/дв.х.).

На рис. 1 представлен эскиз обработки при строгании, а на рис. 2 элемент графика регистрируемой составляющей силы резания  $P_z$  (в частности, при строгании с параметрами  $\varphi = 15^\circ$  и  $S_{\text{дв х}} = 0,4$  мм/дв.х.).

Величина силы резания определялась как разница между средними значениями уровней «нуля» и нагрузки. Количество повторений  $N = 4$ .

Протокол экспериментальных исследований главной составляющей  $P_z$  силы резания при строгании заготовки из стали 45 твердостью 200 НВ резцами из быстрорежущей стали и энергопотребления  $E$  на один рез на длине 100 мм представлены в табл. 1, а результаты расчета энергопотребления  $E$  для обработки плоскости длиной 100 мм для различных значений ширины строгания и при различных подачах приведены в табл. 2.

Схема расчета площади поверхности резания при строгании представлена на рис. 3. Резание является несвободным, поэтому в каждом резе принимают участие главная и вспомогательная режущие

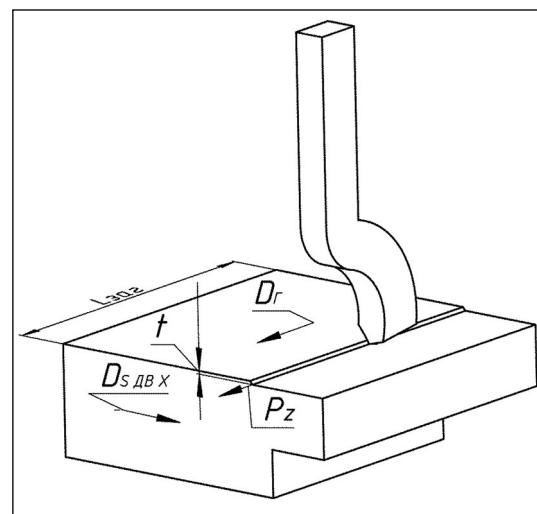


Рис. 1. Эскиз обработки при строгании

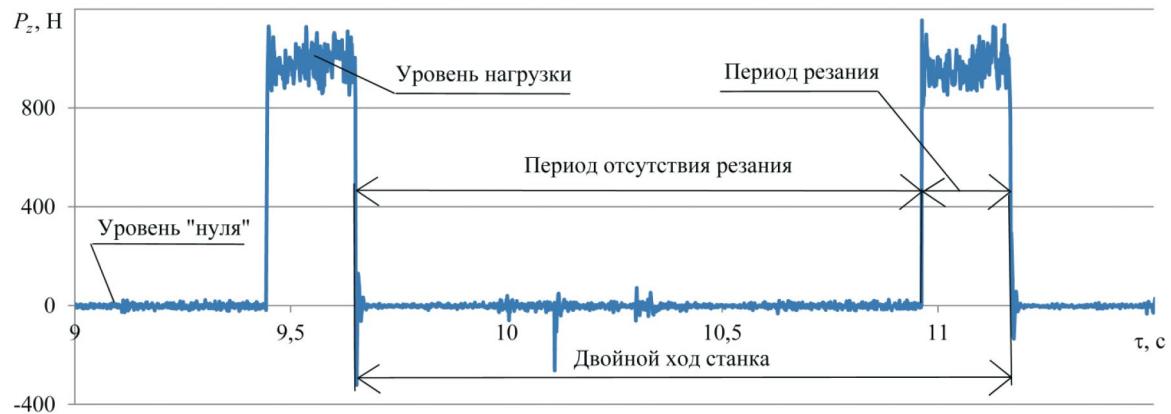
Рис. 2. Элемент графика регистрируемой составляющей силы резания  $P_z$  при строгании

Таблица 1

**Протокол экспериментальных исследований главной составляющей силы резания при строгании заготовки из стали 45 резцами из быстрорежущей стали и энергопотребления на один рез на длине 100 мм**

Подача на двойной ход, $S_{\text{дв.х}}^{\text{р}}$ , мм/дв.х	Сила резания $P_z$ , Н		Энергопотребление $E$ , Дж, на один рез на длине 100 мм	
	Угол $\phi$ , град			
	15	45	15	45
0,2	605	509	60,51	50,93
0,4	993	986	99,32	98,60
0,6	1345	1369	134,48	136,88
0,8	1762	1746	176,20	174,59
1,0	2222	2075	222,15	207,53

Таблица 2

**Результаты расчета энергопотребления при строгании плоскости длиной 100 мм**

Подача на двойной ход $S_{\text{дв.х}}^{\text{р}}$ , мм	Энергопотребление $E$ , Дж, при ширине строгания, мм															
	6		9		12		15		18		21		24		27	
	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45
0,2	1815	1528	2723	2292	3631	3056	4538	3820	5446	4584	6353	5348	7261	6112	8169	6876
0,4	1490	1479	2235	2219	2980	2958	3725	3698	4469	4437	5214	5177	5959	5916	6704	6656
0,6	1345	1369	2017	2053	2690	2738	3362	3422	4034	4106	4707	4791	5379	5475	6052	6160
0,8	1321	1309	1982	1964	2643	2619	3304	3273	3964	3928	4625	4583	5286	5238	5947	5892
1	1333	1245	1999	1868	2666	2490	3332	3113	3999	3736	4665	4358	5332	4981	5998	5603

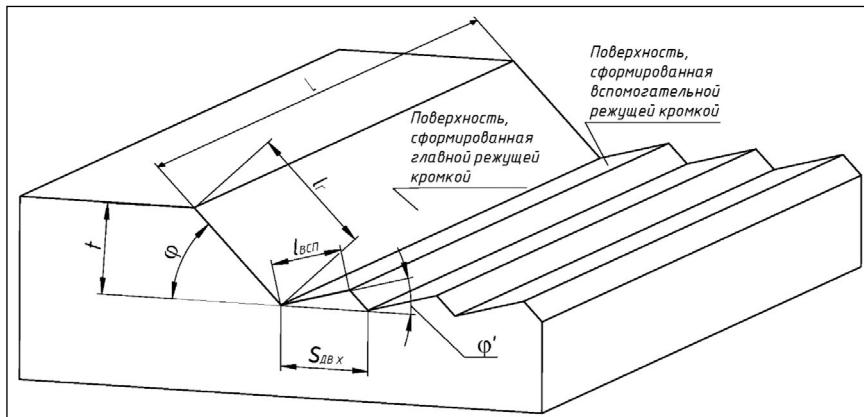


Рис. 3. Схема расчета площади поверхности резания при строгании

кромки. Причем главная режущая кромка формирует площадь, равную произведению ее рабочей длины  $l_\Gamma$  на длину обработки  $L$ . В свою очередь, из рисунка видно, что величина  $l_\Gamma$  может быть определена как отношение глубины резания  $t$  к синусу главного угла в плане  $\phi$ .

Длина рабочей части вспомогательной режущей кромки определяется несложными вычислениями с использованием теоремы синусов через величину подачи на двойной ход и главный  $\phi$  и вспомогательный  $\phi'$  углы в плане.

В результате чего для расчета площади поверхности резания  $S_{\text{нов}}$  использованы следующие зависимости:

$$S_{\text{нов}} = S_{\text{нов} \varphi} + S_{\text{нов} \varphi'}$$
 (2)

где  $S_{\text{нов} \varphi}$  – площадь поверхности, сформированной главной режущей кромкой:

$$S_{\text{нов} \varphi} = l_\Gamma \cdot L = \frac{t \cdot L}{\sin \phi}; \quad (3)$$

$S_{\text{нов} \varphi'}$  – площадь поверхности, сформированной вспомогательной режущей кромкой:

$$S_{\text{нов} \varphi'} = l_{\text{BCP}} \cdot L = \frac{S_{\text{ДВХ}} \cdot \sin \phi}{\sin(\phi + \phi')} \cdot L. \quad (4)$$

Результаты расчета площадей поверхности резания  $S_{\text{нов}}$  для обработки плоскости длиной 100 мм для различных значений ширины строгания и при различных подачах приведены в табл. 3.

Таблица 3

#### Результаты расчета площади поверхности резания при строгании плоскости длиной 100 мм

Подача на двойной ход $S_{\text{дев}, \text{мм}}$	Площадь поверхности резания $S_{\text{нов}}$ , $\text{мм}^2$ при ширине строгания, $\text{мм}$															
	6		9		12		15		18		21		24		27	
	Угол $\phi$ , град															
	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45
0,2	11803	4733	17705	7099	23607	9465	29509	11831	35410	14198	41312	16564	47214	18930	53115	21296
0,4	6008	2611	9012	3917	12016	5222	15020	6528	18024	7834	21028	9139	24032	10445	27036	11750
0,6	4076	1904	6114	2856	8152	3808	10190	4760	12228	5712	14266	6664	16304	7616	18342	8569
0,8	3110	1551	4665	2326	6220	3101	7775	3876	9330	4652	10885	5427	12440	6202	13996	6978
1	2531	1338	3796	2008	5061	2677	6326	3346	7592	4015	8857	4684	10122	5354	11388	6023

## Определение энергопотребления при протягивании

В соответствии с поставленной целью при полном сохранении требований, обеспечивающих соответствия экспериментов, произведен расчет энергопотребления при протягивании плоскостей, имеющих те же размеры, что и при строгании и ранее при фрезеровании.

Усилия протягивания принято определять по удельной силе, приведенной к одному миллиметру режущей кромки. Поэтому для снятия припуска  $t = 1$  мм наружной быстрорежущей протяжкой из стали Р6М5 с заготовки из стали 45 твердостью 200 НВ с принятыми подачами на зуб  $S_z = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$  мм/зуб, шириной  $B = 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24; 27$  мм и длиной  $L = 100$  мм использована методика, представленная в [14].

$$E = p \cdot B \cdot L \cdot \frac{t}{S_z \cdot 1000}, \quad (5)$$

где  $E$  – энергопотребление, Дж;  $p$  – удельная нагрузка на 1 мм режущей кромки для обработки конструкционных сталей, Н/мм;  $B$  – ширина обработки, мм;  $L$  – длина обработки, мм;  $t$  – припуск под обработку, мм;  $S_z$  – подача на зуб, мм/зуб.

Расчет площади поверхности резания проведен в соответствии со схемой, представленной на рис. 4, по формуле:

$$S_{\text{раб}} = B \cdot L \cdot \frac{t}{S_z}.$$

Результаты расчета усилия протягивания для указанных условий и площадей поверхности резания, формируемой при этой обработке, приведены в табл. 4 и 5 соответственно.

Сводное графическое отображение результатов зависимости энергопотребления  $E$  при торцовом и цилиндрическом фрезеровании, строгании и протягивании плоскости нескольких размеров с разными подачами приведено на рис. 5.

Анализ результатов проведенных экспериментов и расчетов позволяет выделить общую для четырех способов обработки тенденцию изменения энергопотребления от площади поверхности резания. Расположение точек на графике соответствует степенной зависимости. Эту гипотезу подтвердила выполненная аппроксимация данных. С коэффициен-

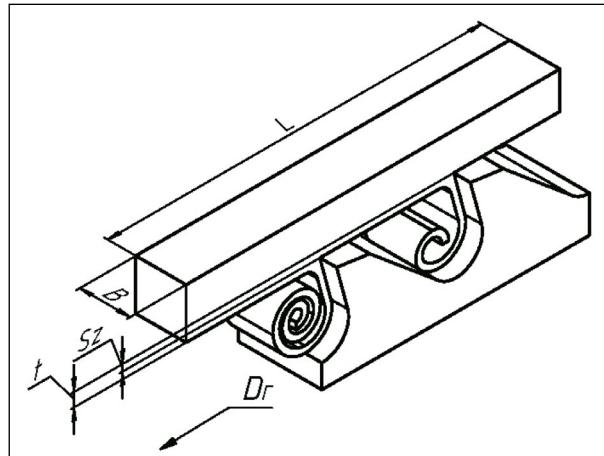


Рис. 4. Схема обработки при протягивании

Таблица 4

Результаты расчета энергопотребления  $E$  при протягивании плоскости протяжкой из быстрорежущей стали Р6М5 заготовки из стали 45

Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб	Удельная нагрузка на 1 мм режущей кромки $p$ , Н/мм	Энергопотребления $E$ , Дж, при ширине протягивания $B$ , мм							
		6	9	12	15	18	21	24	27
0,05	181	2172	3258	4344	5430	6516	7602	8688	9774
0,1	273	1638	2457	3276	4095	4914	5733	6552	7371
0,15	379	1516	2274	3032	3790	4548	5306	6064	6822
0,2	473	1419	2129	2838	3548	4257	4967	5676	6386

Таблица 5

Результаты расчета площади поверхности резания  $S_{нов}$  при протягивании плоскости

Подача на зуб $S_z$ , мм/зуб	Площадь поверхности резания $S_{нов}$ , $\text{мм}^2$ , при ширине протягивания $B$ , мм							
	6	9	12	15	18	21	24	27
0,05	12000	18000	24000	30000	36000	42000	48000	54000
0,1	6000	9000	12000	15000	18000	21000	24000	27000
0,15	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000
0,2	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500

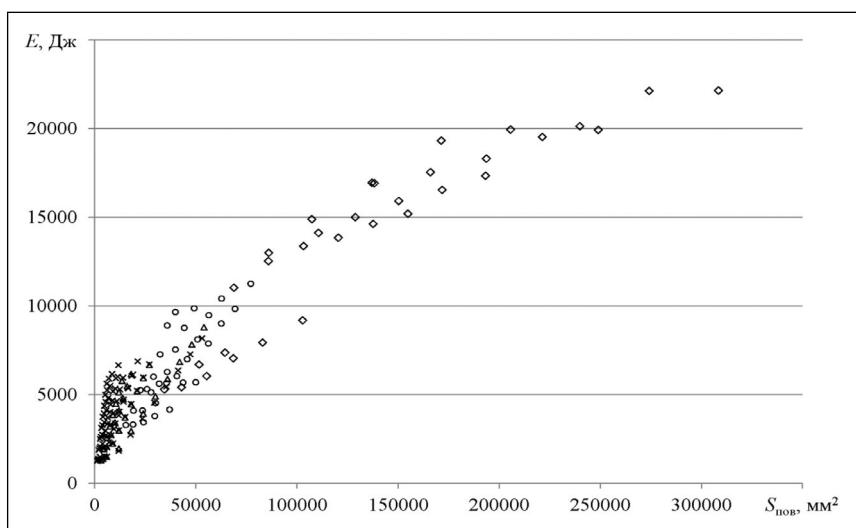


Рис. 5. Зависимости энергопотребления  $E$  при различных способах обработки плоскости длиной  $L = 100$  мм и шириной  $B$  от 6 до 27 мм при различных подачах на зуб  $S_z$  (на дв.х  $S_{дв.з}$ ) от площади поверхности резания  $S_{нов}$ :  $\circ$  – торцовое фрезерование;  $\diamond$  – цилиндрическое фрезерование;  $\times$  – строгание;  $\Delta$  – протягивание

том корреляции, превышающем 0,9, обобщенная зависимость выглядит следующим образом:

$$E = 39,45 \cdot S_{нов}^{0,493}, \quad (7)$$

что, в свою очередь, подтверждает гипотезу о связи между потребляемой энергией на обработку заданной поверхности и площадью поверхности резания, которую формирует режущее лезвие инструмента в процессе указанной обработки вне зависимости от способа снятия припуска, геометрических параметров поверхности и величины подачи.

Использование полученной зависимости позволяет прогнозировать затрачиваемую энергию на обработку заготовок из стали 45 инструментами из быстрорежущей стали Р6М5 и, как следствие, управлять желаемыми результатами, т.е. способствовать энергосбережению в технологических процессах механической обработки. Для этого необходимо определить площадь поверхности

резания по формулам (2), (3), (4), (6) и [14], формируемую режущим лезвием, и оценить величину необходимой энергии по формуле (7). После чего принять решение о возможной корректировке параметров режима резания для уменьшения энергопотребления.

## Выводы

Подтверждена гипотеза о связи между потребляемой энергией на обработку заданной поверхности и площадью поверхности резания, которую формирует режущее лезвие инструмента в процессе указанной обработки вне зависимости от способа снятия припуска, геометрических параметров поверхности и величины подачи.

Полученная степенная зависимость с коэффициентом корреляции более 0,9 для используемого в экспериментах сочетания инструментального и обрабатываемого материалов (быстрорежущая

сталь Р6М5 – сталь 45) позволяет утверждать, что с увеличением площади поверхности резания энергопотребление устойчиво возрастает.

Для реализации мер по энергосбережению можно варьировать в допустимых пределах параметрами режима резания, в частности, подачами и схемой разделения припуска по проходам.

### **Библиографический список**

1. Касимов Л.Н. Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов / Л. Н. Касимов; Касимов Л. Н.; М-во образования Рос. Федерации. Уфим. гос. ун-т сервиса. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2003. – 180 с. – ISBN 5-88469-120-3.

2. Кузнецов А. П. Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Часть 1. Энергоинформационная модель структуры процессов обработки / А. П. Кузнецов // Вестник машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 73-83.

3. Горленко О.А. Распределение припуска между технологическими переходами при обработке отверстий резцами и осевым инструментом / О. А. Горленко, В. М. Малашенко, Н. А. Малашенко // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 4. – С.53-58.

4. Игнатов С.Н. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия / С.Н. Игнатов, А.В. Карпов, А.П. Распопин // СТИН: ежемесячный научно-технический журнал. Москва. 2004. №12. С. 23-26: табл. ISSN 0869-7566.

5. Баранов А.В. Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев / А.В. Баранов // Вестник машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 47-50.

6. Силин С.С. Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критериям / С.С. Силин, А.В. Баранов // СТИН. 1999. № 1. С.16-17.

7. Мальков О.В. Расчет силы резания при обработке внутренней резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами / О. В. Мальков, А. С. Карельский // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 92-100. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100.

8. Мальков О.В. Теоретический расчет составляющих силы резания при резьбофрезеровании / О. В. Мальков, А. С. Карельский // Вестник Магнитогорского государственного технического

университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 44-55. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55.

9. Виноградов Д.В. Исследование сил резания при криволинейном сечении срезаемого слоя / Д. В. Виноградов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 2(65). – С. 23-31. – DOI 10.47617/2072-3172\_2023\_2\_23. – EDN: EYPHVW.

10. Мелкерис Т.В. Определение силы резания для криволинейного сечения срезаемого слоя / Т.В. Мелкерис, Д.В. Виноградов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 12. – С. 124-135. – DOI 10.7463/1214.0745856.

11. Malkov O. Force modeling of thread milling / O. Malkov, A. S. Karelsky // AIP conference proceedings: 45th Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration, Moscow, Russia, 30 марта – 02 2021 года. Vol. 2549. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2021. – P. 170004.

12. Malkov O.V. Cutting Force Analysis During Thread Milling / O. V. Malkov, A. S. Karel'skiy // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021): ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Vol. 2. – Челябинск: Springer, 2022. – P. 563-573. – DOI 10.1007/978-3-030-85230-6\_67.

13. Малькова Л.Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей различными способами фрезерования / Л. Д. Малькова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 12(60). – С. 7. – DOI 10.18698/2308-6033-2016-12-1559.

14. Малевский Н.П. Расчет комбинированных шлицевых протяжек: учеб. пособие по курсу «Основы проектирования режущих инструментов» / Н.П. Малевский, О.В. Мальков; Н.П. Малевский, О.В. Мальков; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 44 с. – ISBN 5-7038-2527-X.

### **References**

1. Kasimov, L. N. Resource-saving technologies of mechanical processing of hard-to-process materials / L. N. Kasimov; Kasimov L. N.; Ministry of Education of the Russian Academy of Sciences. Federations. Ufa State University of Service. Ufa: Designpoligrafservice LLC, 2003. 180 p. ISBN 5-88469-120-3.

2. Kuznetsov A.P. Structures of processes and equipment for cutting processing. Part 1. Energy informational model of structure of manufacturing processes.

- Bulletin of Mechanical Engineering.* 2015. No. 2. pp. 73-83.
3. Gorlenko O.A., Malashenko V. M., Malashenko N.A. The distribution of the allowance between technological transitions when working holes with cutters and axial tools. *Handbook. Engineering Journal*, 2003, No. 4, pp.53-58.
  4. Ignatov, S. N. Evaluation of the effectiveness of blade processing using an infinite energy criterion / S.N. Ignatov, A.V. Karpov, A.P. Raspopin. *STIN: monthly scientific and technical journal*. Moscow. 2004. No. 12. pp. 23-26: table. ISSN 0869-7566.
  5. Baranov A.V. Energy optimization of hole cutting. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2011. No. 3. P. 47–50.
  6. Silin, S.S. Optimization of mechanical processing operations for energy criteria / S.S. Silin, A.V. Baranov. *STIN*. 1999. No. 1. pp.16-17.
  7. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Calculation of Cutting Force when Machining Internal Threads with Thread Milling Cutters. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*.2024,vol.22, No.3,pp.92-100.<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100>
  8. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Theoretical Calculation of the Components of Thread Milling Cutting Forces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2023, vol. 21, No. 4, pp. 44-55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55>
  9. Vinogradov D.V. Investigation of cutting forces at a curved section of the cut laye. *Vestnik MSUT "Stankin"*.
  2023. No. 2(65). P. 23-31. DOI 10.47617/2072-3172\_2023\_2\_23. EDN: EYPHVW.
  10. Melkeris, T. V. Determination of the cutting force for a curved section of the cut layer / T.V. Melkeris, D.V. Vinogradov. *Science and Education: scientific edition of the Bauman Moscow State Technical University*. 2014. No. 12. pp. 124–135. DOI 10.7463/1214.0745856.
  11. Malkov, O. Force modeling of thread milling / O. Malkov, A. S. Karelsky. AIP conference proceedings: 45th Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration, Moscow, Russia, March 30 – April 02, 2021. Vol. 2549. Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2021. P. 170004.
  12. Malkov, O. V. Cutting Force Analysis During Thread Milling / O. V. Malkov, A. S. Karelskiy // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021): ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, May 17–21, 2021. Vol. 2. Chelyabinsk: Springer, 2022. P. 563–573. DOI 10.1007/978-3-030-85230-6\_67.
  13. Malkova L.D. Estimating power consumption for flat surface machining employing various milling techniques. *Engineering Journal: Science and Innovation*. – 2016. No. 12(60). P. 7. DOI 10.18698/2308-6033-2016-12-1559.
  14. Malevsky, N. P. Calculation of combined spline broaches: textbook. course manual “Fundamentals of cutting tools design” / N. P. Malevsky, O. V. Malkov; N. P. Malevsky, O. V. Malkov; Moscow State Technical University. N. E. Bauman University. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004. 44 p. ISBN 5-7038-2527-X.

### Информация об авторе

**Малькова Людмила Дмитриевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологий, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
 ldm@bmstu.ru

### Information about the author

**Malkova Lyudmila Dmitrievna** – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Instrumental engineering and technology”, Bauman Moscow State Technical University  
 ldm@bmstu.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declare no conflict of interest.