

УДК 621.9.01

## Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием

Карпов А.В.

Статья посвящена проблеме рационального потребления энергетических ресурсов при обработке заготовок деталей машин режущими инструментами. Повышение энергетической эффективности технологических процессов рассматривается как необходимый фактор обеспечения конкурентоспособности продукции отечественного машиностроительного комплекса. Показано, что задача повышения энергоэффективности обработки резанием является многоэтапной, и начинать её решение следует с разработки методик оптимизации условий резания: геометрических параметров режущей части инструмента, значений режимов обработки. Для этой цели сформулирован новый интегральный показатель энергетической эффективности («энергетический КПД») процесса резания, представляющий собой отношение удельной энергоёмкости обработки к прочности обрабатываемого материала. Предложены расчётно-эмпирические методики определения критерия энергетической эффективности на примере операции обработки прямоугольного паза дисковой фрезой на горизонтально-фрезерном станке. Реализация предложенной методики оптимизации позволяет сократить энергетические затраты в зоне резания на 12-18% по сравнению с условиями обработки, основанными на применении режимов, приводимых в общем машиностроительных справочниках.

*Ключевые слова:* машиностроение, технологическая система, резание материалов, режущий инструмент, энергетическая эффективность, энергетические затраты, энергоёмкость.

## Revisiting power efficiency estimation of technological processes of cutting

Karpov A.V.

The paper deals with the problem of efficient energy resources consumption when processing blanks of machine parts by means of cutting tools. The energy efficiency increase of technological processes is considered as a necessary factor to ensure national production competitiveness of the mechanical-engineering complex. The problem of increasing energy efficiency of the cutting process is multi-staged. The paper considers a number of techniques to optimize the provisions for the cutting process: geometrical parameters of the cutting part of the tool and the values of processing modes. The paper presents a new integral index of energy efficiency (power efficiency) of the cutting process, which is, in fact, a ratio of processing energy density to the processed material strength. The paper gives a number of calculation-empirical methods to determine energy efficiency criteria, following the example of processing a rectangular groove by a horizontal milling machine disk cutter. Implementing the optimization technique can reduce energy costs in the cutting zone by 12-18% compared to the processing provisions based on the modes provided in General mechanical-engineering reference books.

*Keywords:* mechanical engineering, technological system, materials cutting, a cutting tool, power efficiency, energy expenses, power consumption.

### Введение

Несмотря на высокую материалоемкость и развитие прогрессивных методов бесстружечного формообразования, технологические процессы обработки материалов резанием продолжают занимать наибольший удельный

вес в обрабатывающей стадии машиностроительных производств. На обработку резанием приходится 60-70 процентов трудоёмкости изготовления деталей машин. Это объясняется универсальностью резания – возможностью получать поверхности разнообразных форм,

размеров и качества без значительных переналадок технологической системы.

Поиск наилучшего способа получения изделий неизбежно сталкивается с проблемой наименьшей их себестоимости. Себестоимость определяется, в конечном счёте, совокупными затратами труда, вложенного в производство. Трудозатраты опосредованно характеризуются затратами энергии на каждом этапе технологического процесса. Образование одной тонны стружки сопровождается расходом в среднем 450-600 кВт·ч электроэнергии, и по этому показателю продукция российских предприятий в 1,5-2,5 раза более затратна аналогичной продукции, выпускаемой в Германии, Франции или Швеции.

Потребность в энергии является в настоящее время одним из главных факторов, влияющих на себестоимость продукции и, как следствие, на её конкурентоспособность, что связано со стабильным ростом цен на энергоносители и введением лимитов энергопотребления. По экспертным оценкам, доля финансовых затрат на оплату энергоресурсов в структуре общей себестоимости продукции отечественных машиностроительных предприятий по сравнению с 1984 годом выросла в 10-15 раз и составляет от 15 до 25%.

Таким образом, повышение энергоэффективности технологических процессов обработки резанием путём оптимизации энергетических затрат на их осуществление является необходимым условием роста конкурентоспособности отечественной машиностроительной продукции.

Однако до сих пор в технологии машиностроения отсутствуют единые подходы к количественной оценке энергоэффективности процессов обработки резанием.

Цель исследования - определение и анализ показателей, количественно характеризующих энергетическую эффективность технологических процессов обработки резанием.

### Материал и результаты исследования

Задача повышения энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием должна решаться, как минимум, по трём направлениям:

- снижение энергетических затрат в зоне резания путём предварительного определения и назначения экономичных условий реализации каждой технологической операции, перехода, рабочего хода инструмента;

- снижение потерь энергии в механической части (трансмиссии) металлообрабатывающего оборудования;

- снижение потерь энергии в электрической части металлообрабатывающего оборудования.

Предметом рассмотрения в настоящей статье является первое направление, поскольку механическая работа, совершаемая режущим инструментом при каждом рабочем ходе и определяемая закономерностями стружкообразования, влияет на нагрузочные потери в трансмиссии и устанавливает, в конечном счёте, общее количество энергии, потребляемой двигателем станка из электрической сети.

В качестве критерия энергетической эффективности процесса резания следует принять показатель, который должен удовлетворять ряду требований [4]:

- 1) обладать достаточной полнотой описания объекта;
- 2) иметь чёткий физический смысл;
- 3) быть количественным и выражаться однозначно некоторым числом;
- 4) определяться с допустимой точностью.

На наш взгляд, в роли такого показателя может выступать «энергетический коэффициент полезного действия (энергетический КПД)» стружкообразования, максимизация которого обеспечит достижение необходимой производительности и параметров качества обработки за счёт минимально обоснованного количества энергетических затрат в зоне реза-

ния. Очевидно, для черновой и чистовой стадий технологического процесса обработки резанием данный показатель следует формулировать исходя из различных предпосылок.

Для создания полноценной и адекватной модели расчёта энергетического КПД целесообразно рассмотреть механическую обработку с термодинамических позиций. Конечным результатом любого способа обработки резанием является формирование в материале заготовки новой поверхности с требуемыми размерами, точностью и качеством. Новые поверхности образуются вследствие определённого энергетического воздействия лезвия режущего инструмента на срезаемый слой, при этом величина общих энергозатрат (то есть работа резания)  $A_p$  в зоне контакта инструмента и заготовки достаточно легко коррелируется с рядом управляемых факторов, значениями которых технолог может варьировать в известных пределах, стремясь добиться наилучших выходных характеристик (качество поверхностного слоя, точность и производительность обработки, стойкость инструмента и т.п.). К числу таких управляемых факторов относятся элементы режима резания, геометрические параметры инструмента, марка инструментального материала.

Работа стружкообразования  $A_p$ , Дж, совершаемая режущим клином в течение основного времени технологического перехода  $\tau_{осн}$ , мин, расходуется на упругую и пластическую деформацию материала срезаемого слоя (энергия деформации  $W_{деф}$ , Дж) и на «чистое» диспергирование, заключающееся в создании новых поверхностей на детали и в стружке (свободная поверхностная энергия  $W_{пов}$ , Дж):

$$A_p = W_{деф} + W_{пов}. \quad (1)$$

Согласно первому началу термодинамики и закону сохранения энергии, работа  $A_p$ , в конечном счёте, превращается в теплоту  $Q$  и частично запасается на контактирующих поверхностных слоях детали, стружки и инстру-

мента в виде приращения их внутренних энергий ( $\Delta U_{дет}$ ,  $\Delta U_{стр}$ ,  $\Delta U_{инстр}$  соответственно):

$$A_p = Q + \Delta U \quad (2)$$

или в развёрнутом виде

$$\begin{aligned} A_p &= Q_{деф} + Q_{м.н.} + Q_{м.з} + Q_{дисп} + \Delta U = \\ &= (Q_{дет} + Q_{стр} + Q_{инстр} + Q_{о.с.}) + \\ &+ (\Delta U_{дет} + \Delta U_{стр} + \Delta U_{инстр}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta U = \Delta U_{дет} + \Delta U_{стр} + \Delta U_{инстр}$  – суммарное приращение внутренней энергии в поверхностных слоях детали, стружки и инструмента, Дж;  $Q_{деф}$ ,  $Q_{м.н.}$ ,  $Q_{м.з}$ ,  $Q_{дисп}$  – соответственно теплота внутреннего трения между деформируемыми слоями заготовки, теплота трения по передней и задней граням инструмента и теплота диспергирования (образования новых поверхностей), Дж;  $Q_{дет}$ ,  $Q_{стр}$ ,  $Q_{инстр}$ ,  $Q_{о.с.}$  – соответственно количество теплоты, переходящее в деталь, стружку, инструмент и окружающую среду, Дж.

Уровень и соотношение этих энергий определяют интенсивность износа режущего инструмента, ограничивая допустимые значения режимов резания и, как следствие, производительность [7].

Результаты исследований теплового баланса сыграли значительную роль в решении проблем целенаправленного управления тепловой ситуацией процесса резания дифференцированным воздействием на соответствующие источники тепловыделений и каналы теплоотвода, в общем виде представили информацию для оценки относительной обрабатываемости различных материалов.

Часть работы резания, запасённая в виде приращения внутренней энергии  $\Delta U$ , имеет относительный долевого вклад в общие энергозатраты порядка 0,5-3,0% и в исследованиях тепловых процессов, а также энергетических соотношений при черновой обработке не участвует в виду малости [7].

Характерной особенностью обработки резанием (как черновой, так и чистовой) является отделение стружки за счёт механизмов пластического сдвига и скалывания элементов срезаемого слоя. Объём снятой стружки  $V$ , мм<sup>3</sup>, определяется геометрическими параметрами конкретного способа обработки. Например, при прорезании в заготовке прямоугольного паза глубиной  $t$ , мм, и шириной  $B$ , мм, дисковой фрезой на горизонтально фрезерном станке объём снятой стружки представляет собой объём параллелепипеда:

$$V = BtL, \quad (3)$$

где  $L$  – длина паза, мм.

Если при этом инструмент совершает работу  $A_p$ , Вт·мин, то величина  $e$ , Вт·мин/мм<sup>3</sup>, определяемая отношением

$$e = \frac{A_p}{V}, \quad (4)$$

представляет энергию, затраченную на снятие с заготовки 1 мм<sup>3</sup> стружки при данных условиях и является удельной энергоёмкостью процесса. Поскольку удельная энергоёмкость  $e$  зависит от входных (управляемых) условий, присущих технологическому переходу, её можно рассматривать как некий физический критерий, позволяющий оценивать эффективность применённых условий (режимы резания, геометрические параметры инструмента, наличие или отсутствие охлаждения, марка инструментального материала и т.д.) [1, 2], либо как перспективный критерий их оптимизации:  $e \rightarrow \min$  [5]. К безусловным достоинствам показателя удельной энергоёмкости следует отнести его физическую сущность, а также простоту определения на практике путём соотношения затраченной работы и полученного при этом результата. Так, при фрезеровании паза прямоугольной дисковой фрезой удельные энергозатраты  $e$ , Вт·мин/мм<sup>3</sup>, рассчитываются по формуле:

$$e \approx 5,13 \cdot 10^{-5} \frac{P_Z D n}{B t S_M}, \quad (5)$$

или в Дж/мм<sup>3</sup>

$$e \approx 3,08 \cdot 10^{-3} \frac{P_Z D n}{B t S_M}, \quad (6)$$

где  $P_Z$  – главная составляющая силы резания, Н;  $D$  – диаметр фрезы, мм;  $S_M$  – минутная подача заготовки, мм/мин;  $n$  – частота вращения фрезы, мин<sup>-1</sup>.

Анализ формул (4)-(6) позволяет сделать заключение, что удельная энергоёмкость численно характеризует работу разрушения единицы объёма обрабатываемого материала, иными словами – уровень фактических разрушающих напряжений, возникающих при заданных режимах резания и вызывающих отделение от заготовки необходимого объёма стружки. Поэтому удельную энергоёмкость целесообразно выразить в МПа и соотнести с известными показателями механических свойств обрабатываемого материала, имеющими ту же размерность, – например, с временным сопротивлением при разрыве  $\sigma_B$ , МПа. В этом случае безразмерный показатель

$$q_{\text{черн}} = \frac{\sigma_B}{e} \quad (7)$$

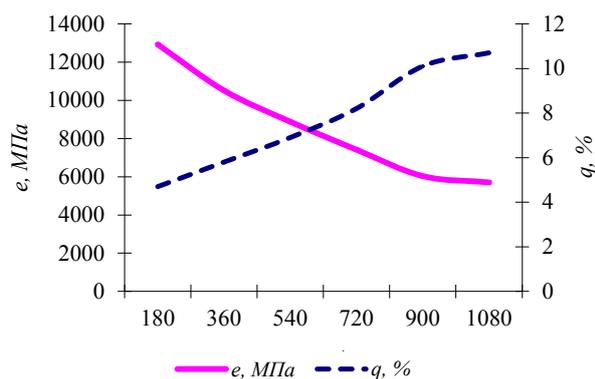
будет являться функцией тех же управляемых параметров, что и удельная энергоёмкость. При обработке заготовок дисковыми и цилиндрическими фрезами

$$q_{\text{черн}} = 0,325 \frac{B t S_M \sigma_B}{P_Z D n}. \quad (8)$$

Следует отметить, что показатели  $e$  и  $q_{\text{черн}}$  не зависят от длины обрабатываемой заготовки  $L$  и основного времени обработки  $\tau_{\text{осн}}$ . Таким образом, с помощью этих удельных показателей можно сравнивать между собой энергетическую эффективность черновых стадий различных технологических процессов обработки резанием.

Например, при фрезеровании паза глубиной  $t = 7$  мм и шириной  $B = 1,6$  мм в заготовке из стали 45 ( $\sigma_B = 610$  МПа) дисковой прорезной фрезой из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром  $D = 80$  мм с числом зубьев  $z = 100$  с

частотой вращения  $n = 160 \text{ мин}^{-1}$ , минутной подачей  $s_m = 835 \text{ мм/мин}$  удельные энергозатраты составляют  $e = 0,101 \text{ Вт} \cdot \text{мин/мм}^3$  или (в пересчёте на условные разрушающие напряжения)  $e = 6035 \text{ МПа}$ . При этом  $q_{\text{черн}} = 0,101$ . Если интенсифицировать образование стружки путём увеличения минутной подачи до предельного для станка модели 6Н81Г значения  $s_m = 1020 \text{ мм/мин}$ , то удельная энергоёмкость снизится до  $5706 \text{ МПа}$ , а величина безразмерного энергетического критерия составит  $q_{\text{черн}} = 0,107$ . Напротив, уменьшив подачу до значения  $s_m = 115 \text{ мм/мин}$ , получаем удельную энергоёмкость  $e = 10514 \text{ МПа}$  и отношение  $q_{\text{черн}} = 0,058$ . Таким образом, показатели  $e$  и  $q_{\text{черн}}$  являются монотонно изменяющимися в зависимости от возрастания (или убывания) значения минутной подачи  $s_m$  (рисунок 1).



**Рис. 1.** Влияние минутной подачи  $s_m$  при фрезеровании паза:

а) на удельную энергоёмкость  $e$ ; б) на безразмерный энергетический критерий  $q$ .

Установлены аналитические зависимости показателей  $e$  и  $q_{\text{черн}}$  от других управляемых факторов процесса резания, значениями которых технолог может варьировать при назначении режущего инструмента и режима резания (частота вращения  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ; глубина резания  $t$ , мм; ширина фрезерования  $B$ , мм, диаметр фрезы  $D$ , мм, число зубьев фрезы  $z$  и др.). Очевидно, режим резания, для которого будут достигнуты минимально допустимые значения

удельной энергоёмкости  $e$ , МПа, и максимально допустимое значение  $q_{\text{черн}}$  обеспечит наибольшую производительность процесса резания данного материала заготовки на данном станке данным инструментом. Для поиска такого режима целесообразно представить один из указанных показателей (например,  $q$ ) в качестве целевой функции ( $q \rightarrow \max$ ) и выполнить процедуру оптимизации [4]. В качестве основных ограничивающих факторов при этом должны выступать технологические возможности металлорежущего станка, стойкость инструмента и его прочность (в случае черновой обработки пазов основной причиной выхода из строя инструмента является поломка фрезы вследствие переполнения стружкой отведённого под её размещение объёма впадины между зубьями фрезы).

Отметим, что разность  $\Delta e = (e - \sigma_B)$ , МПа, представляет своего рода «энергетический резерв» при реализации соответствующего технологического перехода:

$$q_{\text{черн}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_B + \Delta e} \quad (9)$$

Задействовать этот резерв более чем на 20% не удастся вследствие перечисленных выше ограничивающих факторов. Поэтому разность  $\Delta e$  следует рассматривать как вынужденные энергетические потери при стружкообразовании. Очевидно, режим работы инструмента с максимально допустимым значением критерия  $q$  обеспечит проведение технологического перехода (снятие стружки объёмом  $V$ ,  $\text{мм}^3$ ) с минимальными затратами энергии стружкообразования  $A_p$ , Дж, т.е. с максимальным «энергетическим КПД». При этом создаются наиболее благоприятные условия для работы режущего инструмента вследствие минимизации тепловой и динамической напряжённости в технологической системе при одновременном достижении режима наибольшей производительности [3].

Энергетический подход справедлив и для сравнительной оценки эффективности чистовых стадий технологических процессов обработки резанием. Однако, главным результатом оптимизации должны стать условия резания, обеспечивающие заданную точность и качество поверхностного слоя детали. В связи с этим оценка «энергетического КПД» на чистовых технологических переходах по формуле (7) не вполне корректна.

В.К. Старков [6] сформулировал «энергетический критерий качества» в виде отношения

$$\eta_2 = \frac{U_c}{v \cdot S} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $U_c$  – скрытая энергия деформирования поверхностного слоя детали, Дж;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $s$  – подача, мм/об.

В общем балансе работы резания  $A_p$  доля энергии  $U_c$  не превышает 1%, однако, в связи с тем, что запасённая внутренняя энергия охватывает значительно меньшие объёмы, чем выделяемая теплота, удельные величины её

становятся значительными. Поэтому энергия  $U_c$  оказывает заметное влияние на глубину упрочнённого слоя поверхности детали, модуль и знак остаточных напряжений, а также такие эксплуатационные свойства детали, как сопротивление усталости и долговечность при знакопеременном нагружении, коррозионную стойкость и др.

Вычисление значения энергии  $U_c$  носит теоретико-экспериментальный характер, предполагает проведение серии трудоёмких опытов и последующую статистическую обработку с целью получения выражений для расчёта плотности дислокаций, вышедших в результате пластического деформирования на поверхность кристаллов, времени деформирования, степени упрочнения поверхностного слоя. Всё это затрудняет применение предлагаемой методики в условиях производства, заинтересованных в создании энергоэффективных технологий.

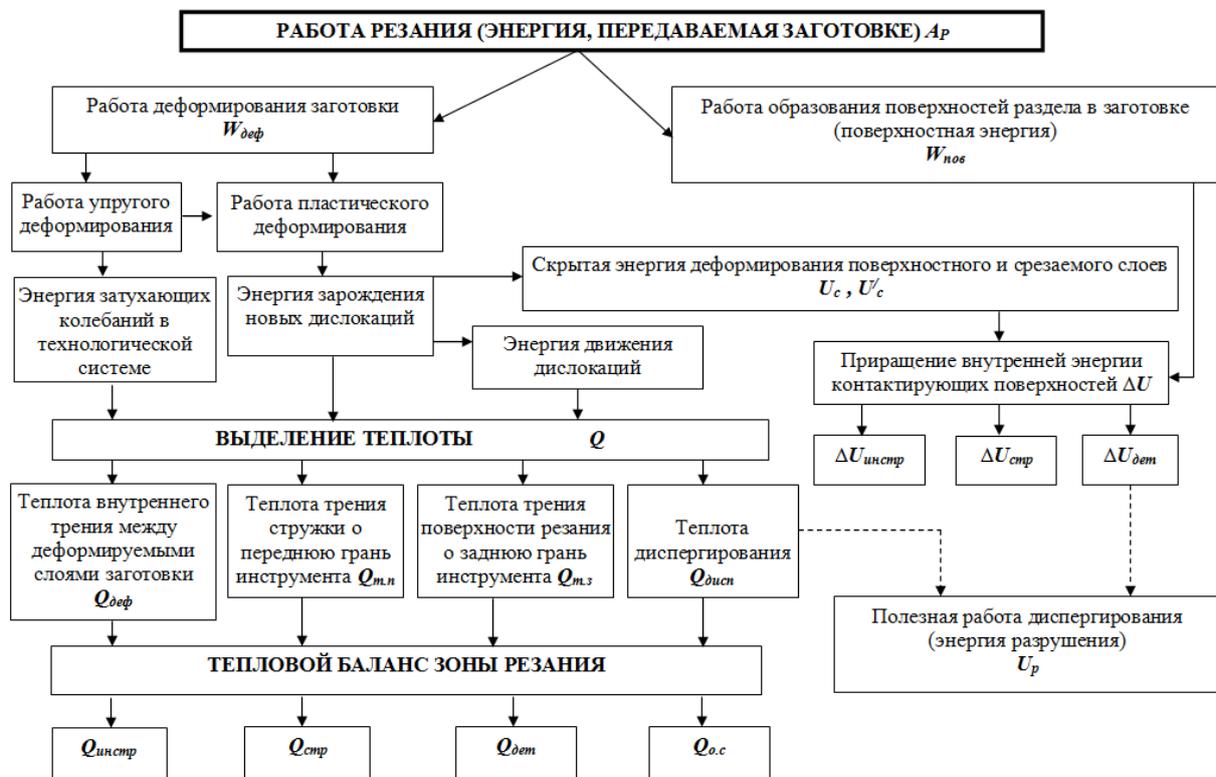


Рис. 2. Схема распределения энергии, передаваемой заготовке.

Альтернативным критерием энергоэффективности режимов чистовых технологических переходов, на наш взгляд, может выступать безразмерное отношение:

$$q_{\text{чист}} = \frac{U_p}{A_p} \rightarrow \max, \quad (11)$$

где  $U_p$  – полезная работа диспергирования (см. рис. 2), Дж;  $A_p$  – общая работа резания, Дж, совершаемая инструментом, и определяемая при фрезеровании по формуле

$$A_p = 3,08 \cdot 10^3 \frac{P_z D n L}{S_M}. \quad (12)$$

Оценка энергии разрушения  $U_p$  проводится на основе анализа протекания процесса пластического деформирования зоны резания и роли, которую играет при этом генерирование, движение и накопление дефектов кристаллического строения материалов, главным образом – краевых и винтовых дислокаций. Проведённые расчёты свидетельствуют, что величина  $q_{\text{чист}}$  при фрезеровании достигает 4% и более, в зависимости от величины припуска, оставляемого под чистовой переход после завершения чернового перехода.

### Заключение

Количественная оценка показателей  $q_{\text{черн}}$  и  $q_{\text{чист}}$  позволяет сделать вывод, что резание материалов лезвийным инструментом, как механический процесс, с энергетических позиций является малоэффективным, по крайней мере в области практически применяемых режимов.

Назначение условий обработки без учёта возможной максимизации  $q_{\text{черн}}$  и  $q_{\text{чист}}$  ведёт к ещё большему перерасходу энергии, требуемой для выполнения всех переходов, составляющих полный технологический маршрут. В результате суммарная энергоёмкость выпускаемой продукции оказывается завышенной (до 20%) по сравнению с оптимальным значением,

что увеличивает внутренние издержки предприятия и, как следствие, себестоимость выпускаемой продукции.

### Литература

1. Карпов А.В., Игнатов С.Н., Распопин А.П. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия // СТИН, 2004, № 12. – С. 23-26.
2. Карпов А.В. К вопросу снижения энергоёмкости технологических процессов обработки резанием // Современные проблемы науки и образования, 2013, № 2; URL: <http://www.science-education.ru/108-8697> (дата обращения: 13.05.2014).
3. Карпов А.В. К вопросу управления процессом резания на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения твёрдых тел // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2011, № 1. – С. 37-49.
4. Карпов А.В. Оптимизация процессов обработки резанием на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения материалов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2012, № 1. – С. 58-64.
5. Карпов А.В. Энергетически экономичные режимы резания // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2008, № 5. – С. 138-144.
6. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
7. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов. – Ташкент: Фан, 1985. – 105 с.

### References

1. Karpov A.V., Ignatov S.N., Raspopin A.P. Ocenka jeffektivnosti lezviyjnoj obrabotki s ispol'zovaniem bezrazmernogo jenergeticheskogo kriterija [Evaluating the effectiveness of the treatment of the blade using the dimensionless energy criterion] // STIN, 2004, № 12. – P. 23-26.
2. Karpov A.V. K voprosu snizhenija jenergojomkosti tehnologicheskikh processov obrabotki rezaniem [On the issue of reducing energy intensity of technological cesses machining] // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija [Modern problems of

science and education], 2013, № 2; URL: <http://www.science-education.ru/108-8697>.

3. *Karpov A.V.* K voprosu upravlenija processom rezanija na osnove jenergeticheskikh zakonornostej deformacii i razrushenija tvjordyh tel [To the question of management of cutting process on the basis of power laws of deformation and destruction of solid materials] // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2011, № 1. – P. 37-49.

4. *Karpov A.V.* Optimizacija processov obrabotki rezaniem na osnove jenergeticheskikh zakonornostej deformacii i razrushenija materialov [Optimization of cutting processes on the basis of the energy patterns of materials deformation and fracture]

// *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2012, № 1. – P. 58-64.

5. *Karpov A.V.* Jenergeticheski jekonomichnye rezhimy rezanija [Energy-saving modes of cutting] // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2008, № 5. – P. 138-144.

6. *Starkov V.K.* Fizika i optimizacija rezanija materialov [Physics and optimization of cutting materials]. – Moscow: Mashinostroenie, 2009. – 640 p.

7. *Jakubov F.J.* Jenergeticheskie sootnoshenija processa mehanicheskoy obrabotki materialov [Energy ratios machining process materials]. – Tashkent: Fan, 1985. – 105 p.

**Статья поступила в редакцию 4 мая 2014 г.**

---

*Карпов Алексей Владимирович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: [krash75@mail.ru](mailto:krash75@mail.ru)

---

*Karpov Aleksey Vladimirovich* – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: [krash75@mail.ru](mailto:krash75@mail.ru)