

УДК 621.91.01

**К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ****Карпов А.В.***Муromский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Муrom, e-mail: krash75@mail.ru*

Предметом рассмотрения статьи являются технологические процессы обработки заготовок режущими инструментами в условиях машиностроительных предприятий. По уровню энергозатрат, приходящихся на единицу выпускаемой продукции или тонну снятой стружки, российское машиностроение продолжает оставаться одним из самых затратных среди промышленно развитых стран мира. Повышение эффективности расходования энергетических ресурсов на стадии обработки резанием является важной задачей, стоящей перед отечественной наукой и производством. Её решение должно начинаться с создания научно обоснованных методов и средств установления энергетически экономичных условий осуществления обработки при выполнении каждой технологической операции, технологического перехода, рабочего хода. Для количественной оценки энергетической эффективности рабочего хода предложен показатель, представляющий собой «энергетический КПД» процесса резания и определяемый отношением удельной энергоёмкости конструкционного материала, подвергаемого резанию, к удельной энергоёмкости стружкообразования. Удельная энергоёмкость материала характеризует его обрабатываемость резанием и должна определяться с учётом физических и механических свойств, вида напряжений в срезаемом слое, типа стружки, цели технологического воздействия (предварительное, окончательное). Удельную энергоёмкость стружкообразования предлагается определять как отношение мощности в зоне резания к производительности процесса. В зависимости от геометрических и кинематических закономерностей, присущих конкретному виду обработки, предложены типовые схемы циклического изменения мощности резания в пределах времени рабочего хода. Предложенный показатель энергетической эффективности может выступать в роли физического критерия оптимизации процессов обработки резанием на иерархических уровнях «технологическая операция», «технологический переход», «рабочий ход». С учётом системы ограничений он позволяет устанавливать энергетически экономичные условия осуществления обработки: вид инструментального материала, геометрию режущего лезвия инструмента, значения режимов резания и других управляемых технологических факторов.

Ключевые слова: конструкционные материалы, обработка материалов резанием, металлорежущие инструменты, технологические факторы, режимы резания, мощность, энергетические затраты, энергетическая эффективность резания, удельная энергоёмкость стружкообразования

**TO THE ISSUE OF INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES OF MATERIALS CUTTING****Karpov A.V.***The Murom Institute (branch) of the Federal state budgetary educational institution of higher education
«The Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs»,
Murom, e-mail: krash75@mail.ru*

The subject of the article is the technological processes of processing of blanks with cutting tools in the conditions of machine-building plants. According to the level of energy consumption per unit of output or ton of removed chips, Russian engineering continues to be one of the most expensive among the industrialized countries of the world. Improving the efficiency of energy consumption at the cutting stage is an important task facing the domestic science and industry. Its solution should begin with the creation of science-based methods and means of establishing energy-efficient conditions for cutting during each technological operation, technological transition, operating stroke. To quantify the energy efficiency of the working stroke we proposed indicator, which is an «energy efficiency» of the cutting process and determined by the ratio of the specific energy consumption of the structural material to be cut, to the specific energy intensity of chip formation. The specific energy consumption of the material characterizes its machinability by cutting and should be determined taking into account the physical and mechanical properties, the type of stresses in the cut layer, the type of chip, the purpose of the technological procedure (preliminary, final). The specific energy intensity of chip formation is proposed to be defined as the ratio of power in the cutting zone to the cutting process productivity. Depending on the geometric and cinematic patterns inherent in a particular type of processing, the typical schemes of cyclic changes in cutting power within the operating stroke time are proposed. The proposed indicator of energy efficiency can act as a physical criterion for optimizing the processes of cutting at «technological operation», «technological transition», «operating stroke» hierarchical levels. Taking into account the system of restrictions, it allows to set energy-efficient processing conditions: the type of tool material, the geometry of the cutting blade of the tool, the values of cutting parameters and other controlled technological factors.

Keywords: structural materials, material cutting, metal-cutting tools, technological factors, cutting parameters, power, energy consumption, energy efficiency of cutting, specific energy intensity of chip formation

Несмотря на всё большее распространение экологических и ресурсосберегающих технологий в обрабатывающих отраслях промышленности, российское машиностроение, по различным эксперт-

ным оценкам, продолжает оставаться одним из наиболее затратных по уровню материалоемкости и энергоёмкости среди индустриально развитых стран Европы, Азии, Америки.

Среди формообразующих методов обработки конструкционных материалов значительная доля принадлежит резанию, на которое приходится до 60–75% трудоёмкости изготовления деталей при всех типах производства – от единичного до крупносерийного. К достоинствам обработки резанием относятся её универсальность и гибкость: возможность получать поверхности разнообразных форм, размеров и качества с использованием широкой гаммы металлорежущего оборудования с ЧПУ и стандартизованного восстанавливаемого инструмента без длительных и дорогостоящих переналадок технологической системы.

В среднем на образование тонны стружки российскими предприятиями затрачивается 400–650 кВт·ч электроэнергии, вследствие чего энергетический фактор существенно влияет на себестоимость продукции и конкурентоспособность отечественного машиностроительного комплекса. Вместе с тем в практической деятельности технологических служб большинства предприятий при разработке и нормировании технологических процессов условие эффективного расходования энергетических ресурсов либо не рассматривается вовсе, либо учитывается опосредованно – через такие показатели, как максимум производительности, наименьшие приведённые затраты, наибольшая стойкость инструмента и т.п. Однако в современных условиях экономические показатели производства подвержены частым конъюнктурным изменениям, зависят от сложившихся условий их расчёта на конкретном предприятии, что вряд ли позволит использовать их для создания обоснованных методик оптимизации действующих производств в части экономии ресурсов. Для этого необходимы иные, физически обоснованные показатели. Например, в Германии, Швеции, Японии многие десятилетия используют энергетические критерии совершенства процессов обработки металлов: удельную энергоёмкость (величину энергозатрат на единицу снятой стружки) и удельную энергоэффективность (съём стружки на единицу мощности) [1].

В настоящее время российские предприятия, вне всяких сомнений, обладают глубоким и далеко не полностью реализованным потенциалом повышения энергетической эффективности применяемых и вновь разрабатываемых технологий обработки металлов резанием. Реализация этого потенциала представляет собой комплексную научную проблему, которую целесообразно разделить на две взаимосвязанные части:

– снижение энергозатрат в зоне резания за счёт применения энергетически эконо-

мичных условий осуществления каждого элемента технологического процесса: технологической операции, технологического перехода, рабочего хода;

– снижение энергозатрат в элементах и звеньях привода конкретной единицы металлорежущего оборудования.

Величина работы, совершаемой лезвием режущего инструмента при стружкообразовании и определяемой закономерностями деформации и разрушения материала срезаемого слоя, прямо влияет на уровень энергии в трансмиссии станка и устанавливает, в конечном счёте, суммарное количество энергозатрат, потребляемых единицей металлорежущего оборудования в течение основного времени технологического перехода или рабочего хода. Поэтому первоочередной задачей, входящей в комплексную проблему рационального энергопотребления технологических систем обработки резанием, является создание научно обоснованных методов и средств минимизации энергозатрат непосредственно в зоне резания. Обоснованию подходов к решению этой задачи, представляющей интерес для специалистов в теории и практике обработки резанием, посвящена настоящая статья.

Цель исследования: разработка и анализ показателей, позволяющих оценивать энергетическую эффективность стружкообразования при различных технологических процессах обработки резанием и устанавливать экономичные условия осуществления технологической операции, технологического перехода, рабочего хода, соответствующие минимуму удельных энергозатрат в зоне резания.

Материалы и методы исследования

Показатель энергетической эффективности стружкообразования

Условие повышения энергетической эффективности в зоне резания запишем в виде

$$K = \frac{\Delta w}{e} \rightarrow 1, \quad (1)$$

где K – безразмерный показатель энергетической эффективности («энергетический КПД») применительно к рабочему ходу инструмента; Δw – удельная энергоёмкость обрабатываемого материала («полезная» энергетическая составляющая); e – удельная энергоёмкость стружкообразования (общая энергетическая составляющая). Показатель K , представленный в виде отношения (1), позволяет сопоставить количество энергозатрат, необходимых для образования единичного объёма стружки,

с общим уровнем энергии, приходящейся на единицу объёма срезаемого слоя при тех или иных технологических условиях обработки. Показатель K может использоваться в качестве критерия оптимизации управляемых технологических условий обработки, к важнейшим из которых относятся назначаемые (или выбираемые из множества имеющихся вариантов) факторы режущего инструмента (инструментальный материал, форма, конструкция и геометрия лезвия, число зубьев и т.п.), а также элементы режима резания (глубина резания, подача, скорость резания).

Оценка удельной энергоёмкости обрабатываемого материала в условиях резания

Резание можно рассматривать не только как процесс сугубо технологического воздействия на заготовку, но и как самостоятельный вид испытания и нагружения конструкционного материала контрольным – режущим лезвием. Любой вид нагружения и испытания материала требует количественной оценки затрачиваемой на это энергии. Например, диаграммы «напряжение – деформация», полученные в условиях растяжения, сжатия, кручения, сдвига, изгиба и т.д., свидетельствуют в том числе о величине удельной энергоёмкости материала при перечисленных видах испытаний, количественно определяемой значением площади под соответствующей кривой. Если считать резание процессом глубокой пластической деформации и разрушения сплошности материала [1], то удельную энергоёмкость последнего Δw можно представить как предельное приращение внутренней энергии единичного объёма до разрушения, т.е. как разность между критическим $[u]$ и начальным u_0 значениями внутренней энергии:

$$\Delta w = [u] - u_0. \quad (2)$$

Разрушение начинается при накоплении деформируемыми объёмами срезаемого слоя энергии предельной величины $[u]$, лимитируемой прочностными характеристиками материала при сдвиге, сжатии, отрыве [2]. Такая трактовка показателя удельной энергоёмкости Δw позволяет рассматривать его в качестве технологического свойства, характеризующего способность материала подвергаться резанию [3].

В зависимости от преобладающего вида деформации и разрушения (вязкое, квазивязкое, хрупкое) достижение локальными объёмами материала предельного уровня внутренней энергии $[u]$ при резании происходит либо за счёт достижения критической

величины пластической деформации, либо путём развития трещины.

Определение величины Δw на предварительных стадиях технологического процесса (черновая обработка) можно осуществлять в зависимости от типа отделяемой стружки, поскольку тип стружки обусловлен механизмом и интенсивностью протекания пластической деформации материала при внедрении режущего клина. Установить род и величину преобладающих напряжений, вызывающих стружкообразование в срезаемом слое, рассчитать их работу можно по форме и размерам стружки. Стружкообразование происходит либо по механизму сдвига, вызываемому касательными напряжениями в плоскостях сдвига, либо по механизму отрыва, вызываемому действием нормальных напряжений. Удельную энергоёмкость Δw при образовании стружек сдвига (элементная, суставчатая, сливная) примем равной удельной работе деформации $e_{\text{деф}}$, определяемой произведением касательных напряжений τ на величину относительного сдвига ε [4]:

$$\Delta w = [u] - [u_0] = e_{\text{деф}} = \tau_p \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \approx \frac{1,5 \sigma_b}{1 - 1,7 \psi_b} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right), \quad (3)$$

где σ_b – известные механические характеристики материала; T_0 – начальная температура; T_s – температура плавления [3, 4].

Нормальные напряжения отрыва ответственны за образование стружки надлома в условиях хрупкого разрушения материалов высокой твёрдости. Удельную энергоёмкость Δw в этом случае считаем равной наибольшей удельной работе этих напряжений:

$$\Delta w = e_{\text{деф}} = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \approx \frac{1}{2} \cdot \sigma_b \cdot \delta = \frac{\sigma_b^2}{2 \cdot E}, \quad (4)$$

где δ – относительное удлинение при растяжении; E – модуль упругости I рода.

Разрушение может быть рассмотрено и с теплофизических позиций: объём материала разрушается, если поглощённая им энергия равна удельной теплоте плавления H_T :

$$\Delta w = [u] - u_0 = H_T =$$

$$= \int_{T_0}^{T_s} (C_p \rho) dT \approx C_p \rho (T_s - T_0), \quad (5)$$

где C_p – удельная теплоёмкость; ρ – плотность. Такая трактовка удельной энергоёмкости материала Δw при резании имеет смысл в случае вязкого разрушения, проявляющегося в возникновении сливной стружки и переходной зоны пластического

контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия. Расчёт удельной энергоёмкости материала Δw через теплофизические свойства был апробирован нами для высокоскоростных методов окончательной (чистовой) лезвийной обработки, а также для операций шлифования.

*Оценка удельной энергоёмкости
стружкообразования*

Удельная энергоёмкость стружкообразования e , составляющая знаменатель предложенного нами показателя энергетической эффективности K (выражение (1)), представляет собой удельную работу резания, т.е. работу, совершаемую режущим инструментом заданного типа и геометрии по превращению в стружку единичного объёма материала заготовки. Применительно к отдельно взятому технологическому переходу или рабочему ходу величина e зависит как от управляемых (заданных), так и управляемых (оптимизируемых) технологических факторов. К числу первых относятся вид и физико-механические свойства обрабатываемого материала, вид и состояние поверхностного слоя заготовки, размеры заготовки и непосредственно метод обработки, реализуемый в условиях рассматриваемого технологического перехода или рабочего хода, с присущими ему геометрическими и кинематическими закономерностями (точение, сверление, фрезерование и т.д.). Важнейшим достоинством показателя e является его устойчивая функциональная зависимость от большого количества управляемых технологических факторов – в первую очередь параметров режущего инструмента и элементов режима резания, обоснованный выбор, назначение или расчёт которых есть ключевая задача технологической подготовки производства новых изделий и совершенствования действующих технологических процессов.

В работе [5] нами проанализированы достоинства и недостатки показателя удельной энергоёмкости как критерия оптимизации управляемых технологических факторов. В известных работах, посвящённых оптимизации процесса резания по этому критерию, величину удельной энергоёмкости обычно определяют в виде [1]:

$$e = \frac{A_{\text{рез}}}{V} = \frac{N}{\Pi}, \quad (6)$$

где $A_{\text{рез}}$ – работа резания; V – объём стружки; N – мощность; Π – производительность (объём стружки, снятой за минуту). Мощность резания N в течение основного времени технологического перехода или рабочего хода T_o в существующих исследованиях

обычно полагается постоянной ($N = \text{const}$), что в практике механической обработки встречается редко (так называемое «стационарное резание»). Вследствие геометрических и кинематических особенностей формообразования детали при конкретном методе обработки мощность, развиваемая в зоне резания, не остаётся постоянной, а изменяется однократно или циклически по той или иной закономерности. Большинство применяемых в машиностроении методов и приёмов обработки резанием можно отнести к одной из четырёх типовых схем однократного или периодического изменения мощности N в пределах времени T_o . Подробно эти типовые схемы рассмотрены и проанализированы в [5].

Если в течение основного времени T_o мощность резания изменяется по одной из типовых схем несколько раз (циклически), то применительно к одному полному циклу её изменения введём понятие цикловой работы резания $A_{\text{ц}}$, численно равной площади под кривой графика «мощность – время» $N = N(T)$, соответствующей данной типовой схеме:

$$A_{\text{ц}} = \int_0^{T_{\text{ц}}} N(T) dT = k_N \cdot N_{\text{max}} \cdot T_{\text{ц}} = \frac{k_N \cdot N_{\text{max}} \cdot T_o}{n_{\text{ц}}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{ц}}$ – время одного полного цикла изменения мощности резания в пределах основного времени T_o ; $n_{\text{ц}} = T_o / T_{\text{ц}}$ – количество циклов изменения мощности резания в пределах времени T_o ; k_N – коэффициент аппроксимации типовой схемы изменения мощности резания $N = N(T)$, позволяющий рассчитать площадь под её кривой с использованием характерных значений ординаты N_{max} (максимальное значение мощности резания за цикл её изменения) и абсциссы $T_{\text{ц}}$. Таким образом, для расчёта удельной энергоёмкости процесса резания e вместо отношения (6), справедливого лишь для стационарного режима стружкообразования ($N = \text{const}$), следует применять более общее выражение:

$$e = \frac{A_{\text{рез}}}{V} = \frac{n_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}}}{V} = \frac{n_{\text{ц}} \cdot \int_0^{T_{\text{ц}}} N(T) dT}{V} = \frac{n_{\text{ц}} \cdot k_N \cdot N_{\text{max}} \cdot T_{\text{ц}}}{V} = \frac{k_N \cdot N_{\text{max}}}{\Pi}. \quad (8)$$

Учёт фактора и конкретной закономерности изменения мощности резания во

времени позволяет значительно повысить точность определения величины удельной энергоёмкости стружкообразования e при различных методах обработки широкого спектра конструкционных машиностроительных материалов.

Результаты исследования и их обсуждение

С учётом фактора закономерного циклического изменения мощности резания в течение основного времени технологического перехода или рабочего хода условие повышения энергетической эффективности в зоне резания (1) приобретает вид

$$K = \frac{\Delta w \cdot V}{n_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}}} = \frac{\Delta w \cdot V}{n_{\text{ц}} \cdot \int_0^{T_{\text{ц}}} N(T) dT} \rightarrow 1. \quad (9)$$

Дальнейшее математическое преобразование выражения (9) применительно к наиболее распространённым методам обработки (точению, сверлению, фрезерованию и т.д.) влечёт необходимость определения значения мощности резания N через известные показатели свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры лезвия инструмента и режимы резания [6]. В результате получаются целевые функции общего вида $K \rightarrow 1$, аргументами которых являются управляемые (оптимизируемые) факторы конкретного метода обработки, реализуемого на данной технологической операции, технологическом переходе или рабочем ходе. Условию $K \rightarrow 1$ способствует увеличение производительности стружкообразования Π , поэтому показатель K соответствует важному экономическому критерию эффективности обработки – наименьшему штучному времени. В отличие от последнего, показатель K характеризует не только производительность стружкообразования, но и необходимые для этого энергетические затраты.

Выводы

1. Для решения комплексной проблемы рационального расходования энергетических ресурсов при осуществлении технологических процессов обработки резанием сформулирован и рассмотрен показатель энергетической эффективности стружкообразования, который может выступать в качестве критерия оптимизации управляемых условий обработки на иерархических уровнях: «технологическая операция», «технологический переход», «рабочий ход».

2. Показатель энергетической эффективности стружкообразования представляет собой отношение удельной энергоёмкости обрабатываемого материала к удельной работе инструмента в зоне резания.

3. Удельная энергоёмкость конструкционного материала может быть определена либо как плотность работы преобладающего рода напряжений в срезаемом слое, ответственных за образование соответствующего типа стружки, либо как энтальпия плавления.

4. Для корректного определения величины удельной энергоёмкости стружкообразования следует обязательно учитывать закономерное циклическое изменение мощности резания в течение основного времени технологического перехода или рабочего хода.

Список литературы

1. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
2. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск: Вышэйша шк., 1990. 512 с.
3. Карпов А.В. Ускоренный метод определения обрабатываемости конструкционных материалов с использованием показателя удельной работы резания // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11–2. С. 183–187.
4. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2012. 304 с.
5. 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.
6. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Издание 6-е, перераб. и доп. // Под ред. А.М. Дальского. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 1574 с.