

УДК 621.9.01

А.В. Карпов

A.V. Karpov

Муромский институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет»
Murom Institute of Vladimir State University

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

INDEXES OF POWER EFFICIENCY OF CUTTING PROCESS

Приведены показатели энергетической эффективности процесса резания.

Ключевые слова: машиностроение, резание металлов, энергетическая эффективность, работа резания.

The indexes of power efficiency of cutting process are resulted.

Key words: machine-building, cutting of metals, power efficiency, energy of cutting

Машиностроение характеризуется высоким уровнем электрификации оборудования, значительным количеством материалов и ресурсов, расходуемых на технологические цели. Удельный вес энергетической составляющей в себестоимости продукции ранее не превышал 5–7 % и обычно учитывался через накладные расходы. В течение двух последних десятилетий доля энергозатрат в себестоимости увеличилась до 20–25 % и имеет тенденцию к дальнейшему росту.

Значительную долю в обрабатывающей стадии машиностроительных производств занимает механическая обработка. Несмотря на прогресс в получении поверхностей деталей без снятия стружки (давлением, точным литьем, сваркой), обработке резанием по-прежнему принадлежит 60–70 % общей трудоемкости изготовления деталей машин. Это объясняется универсальностью обработки резанием – возможностью получать поверхности разнообразных форм, размеров и качества относительно дешевым способом, без значительных переналадок технологической системы. Повышение эффективности обработки резанием за счет оптимального расходования энергетических ресурсов является актуальной научно-практической задачей.

Оптимальное расходование энергетических ресурсов возможно в случае использования энергоэффективного, экономичного металлообрабатывающего оборудования. Вплоть до настоящего времени в машиностроительных цехах широко используются универсальные металлорежущие станки. По уровню энергопотребления такое оборудование оказывается весьма затратным.

Создание новых и повышение энергоэффективности действующих металлорежущих станков и комплексов должны основываться на методах сокращения потерь энергии по цепи: *электрическая сеть* \Rightarrow *преобразователь электрической энергии в механическую* \Rightarrow *трансмиссия* \Rightarrow *зона резания*. Учитывая различную природу явлений, протекающих в звеньях этой цепи, целесообразно решать задачу энергоэффективности оборудования на трех уровнях:

- внедрение экономичных методов преобразования электрической энергии в механическую;
- внедрение экономичных методов транспортирования механической энергии в зону резания;
- использование экономичных условий и параметров резания.

Для теории резания представляет интерес третий уровень. Именно работа резания, т.е. работа, совершаемая режущим инструментом, определяет в конечном счете количество энергии, потребляемой двигателем станка из электрической сети, а также нагрузочные потери в трансмиссии. Поэтому решение поставленной выше задачи следует начинать с конечного звена цепи путем установления экономичных (оптимальных) условий реализации и параметров процесса резания.

Работа резания в пределах основного времени одного технологического перехода складывается из энергозатрат, расходуемых:

- на процесс отделения стружки с поверхности резания – стружкообразование;
- на процесс образования новых поверхностей – формообразование.

Величина этих энергозатрат определяется прежде всего видом и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. В большинстве случаев обрабатываемый материал задан чертежом детали (либо операционным эскизом) и на стадии технологической подготовки производства изменен быть не может, вследствие чего является для системы резания неуправляемым фактором.

Кроме вида и свойств обрабатываемого материала на величину работы резания влияют: состояние поверхностного слоя заготовки, площадь срезаемого слоя, вид и свойства инструментального материала, качество поверхностей и геометрические параметры режущей части инструмента, элементы режима резания, наличие и характеристики СОТС, другие условия реализации

и параметры процесса резания, которые все вместе образуют совокупность управляемых факторов. Как известно, значения управляемых факторов любой системы, в том числе системы резания, следует определять на основе методик оптимизации.

В течение 1997–2005 гг. в Муромском институте Владимирского государственного университета были созданы и успешно апробированы методики структурной и параметрической оптимизации технологических процессов изготовления деталей машин, включающих операции обработки резанием, по критерию минимальной удельной энергоемкости процесса резания [2–4]. Удельная энергоемкость процесса резания численно характеризует количество энергии, затрачиваемой режущим инструментом на отделение в виде стружки единицы объема срезаемого слоя либо на образование единицы площади вновь обработанных поверхностей. Удельная энергоемкость служит, по сути, физическим показателем эффективности процесса резания, если в результате этого процесса стружкообразование осуществляется с приемлемой производительностью при обеспечении заданного периода стойкости инструмента либо обработанные поверхности получаются с требуемой формой, размерами и качеством. Чем меньше величина удельной энергоемкости при соблюдении требуемых результатов обработки, тем более эффективно протекает обработка, тем более эффективными признаются примененные значения управляемых факторов системы резания. К несомненным достоинствам использования показателя удельной энергоемкости следует отнести простоту определения этого показателя как теоретическими, так и экспериментальными методами [5].

Наряду с термином «удельная энергоемкость процесса резания» в литературе встречаются термины «удельная работа резания», «плотность работы резания», «удельные энергозатраты резания». Все они описывают один и тот же показатель и имеют равноправное применение.

Вместе с достоинствами критерия минимальной удельной энергоемкости процесса резания следует отметить ряд недостатков, обнаруженных при разработке и применении методик оптимизации. Во-первых, удельная энергоемкость является размерным показателем и не позволяет определить, какая часть энергии расходуется непосредственно на деформацию и (или) разрушение единицы объема срезаемого слоя, либо образование единицы площади новых поверхностей (полезная составляющая), а какая часть энергии затрачивается на механические и физико-химические процессы, неизбежно сопровождающие стружко- и формообразование. Во-вторых, используя показатель удельной энергоемкости, затруднительно сопоставлять уровень энергии, развиваемой в технологической системе, с предельным энергетическим состоянием обрабатываемого материала, определяемым его физико-механическими и теплофизическими свойствами. В третьих, оперирование удельной энерго-

емкостью, выражаемой отношением работы резания к объему срезаемого слоя, предполагает изотропию материала по сечению срезаемого слоя и стружки (наружный слой стружки «уровнивается» в свойствах с прирезцовым). В-четвертых, удельная энергоемкость процесса резания пропорциональна мощности резания, при этом мощность резания полагается постоянной в течение всего времени стружкообразования, что справедливо только для стационарного резания.

В качестве интегральной характеристики эффективности процесса резания предлагается безразмерный энергетический показатель K – «энергетический КПД»:

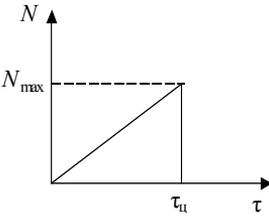
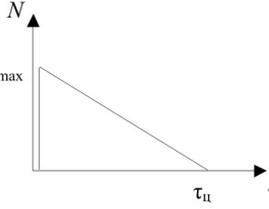
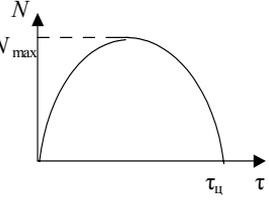
$$K = \frac{\Delta w \cdot V}{n_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}}} = \frac{\Delta w \cdot V}{n_{\text{ц}} \cdot \int_0^{\tau_{\text{ц}}} N(\tau) \, d\tau}, \quad (1)$$

где Δw – удельная энергоемкость обрабатываемого материала; V – объем обрабатываемого материала, подвергнувшегося воздействию; $n_{\text{ц}}$ – число циклов изменения мощности резания $N(\tau)$ в единицу времени стружкообразования; $A_{\text{ц}}$ – работа резания за время $\tau_{\text{ц}}$ одного цикла изменения мощности резания.

Многообразие встречающихся в технологической практике закономерностей изменения мощности резания во времени стружкообразования можно свести к четырем типовым схемам (таблица).

Типовые схемы изменения мощности резания

Закономерность изменения мощности резания за время одного цикла	Схема изменения мощности резания за время одного цикла	Методы лезвийной обработки	Работа резания за время одного цикла изменения мощности резания
Схема 1: мощность постоянна (установившийся режим)		Точение продольное цилиндрическое наружное и внутреннее, прочие способы обработки с постоянными параметрами срезаемого слоя	$A_{\text{ц}} = N \cdot \tau_{\text{ц}}$

Закономерность изменения мощности резания за время одного цикла	Схема изменения мощности резания за время одного цикла	Методы лезвийной обработки	Работа резания за время одного цикла изменения мощности резания
Схема 2: мощность монотонно возрастает до максимального значения и интенсивно убывает		Сверление; рас-сверливание; ци-линдрическое, дисковое, торцо-вое односторон-нее, концевое одностороннее фрезерование против подачи (встречное фрезе-рование)	$A_{ц} = \frac{1}{2} N_{\max} \cdot \tau_{ц} = N_{\text{ср}} \cdot \tau_{ц}$
Схема 3: мощность интенсивно возрастает до максимального значения и монотонно убывает		Точение попереч-ное; цилиндриче-ское, дисковое, торцовое одно-стороннее, конце-вое односторон-нее фрезерование по подаче (попут-ное фрезе-рование)	$A_{ц} = \frac{1}{2} N_{\max} \cdot \tau_{ц} = N_{\text{ср}} \cdot \tau_{ц}$
Схема 4: мощность изменяется по параболическому закону		Разрезание; тор-цовое и концевое фрезерование симметричное и асимметричное двустороннее; строгание; долб-ление; протя-гивание	$A_{ц} = \frac{2}{3} N_{\max} \cdot \tau_{ц} = \frac{4}{3} N_{\text{ср}} \cdot \tau_{ц}$

Под временем (точнее – продолжительностью) $\tau_{ц}$ одного цикла измене-ния мощности резания будем понимать либо фиксированный промежуток времени стружкообразования при установившемся режиме (см. таблицу, схе-ма 1), либо промежуток времени стружкообразования, в течение которого наблюдается полное однократное изменение мощности резания при неустан-овившемся режиме (схемы 2–4). На основе данных таблицы можно опреде-лить величину работы резания $A_{ц}$, совершаемой режущим инструментом за

время $\tau_{ц}$, показатель K и тем самым количественно оценить энергетическую эффективность процесса резания.

Удельную энергоемкость обрабатываемого материала Δw будем трактовать как критическое изменение внутренней энергии единицы объема обрабатываемого материала, т.е. как разность между предельным $[u]$ и начальным u_0 уровнями объемной плотности внутренней энергии:

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

При определении величины $[u]$ для широкого спектра конструкционных материалов можно руководствоваться энергетическими концепциями разрушения твердых тел: объем материала разрушается, если накопленная в нем энергия вследствие внешнего воздействия достигла предельной величины. В соответствии с первым началом термодинамики внешнее воздействие может быть механическим или тепловым. Тело считается разрушенным, если хотя бы в одном его локальном объеме плотность внутренней энергии возросла до критической величины $[u]$. Критическое изменение плотности внутренней энергии может быть определено с использованием показателей теплофизических свойств материала:

$$\Delta w = [u] - u_0 = H_T + L_m = \int_{T_0}^{T_s} (C_p \rho) dT + L_m = C_p \rho (T_s - T_0) + L_m,$$

где H_T – удельная теплота плавления материала; C_p – средняя удельная весовая теплоемкость; ρ – плотность; T_s – температура плавления; T_0 – начальная температура; L_m – скрытая теплота плавления, представляющая собой удельную энергию, затрачиваемую на расплавление единичного объема материала, нагретого до температуры плавления T_s .

Согласно [1] сумма $(H_T + L_m)$ определяет общую удельную энергию неустойчивого роста трещины в твердом теле. Накопление материалом энергии критической величины осуществляется либо бездислокационным путем (например, за счет нагрева до температуры T_s), либо за счет накопления критической плотности дефектов кристаллической решетки (в первую очередь – дислокаций). Энергия, равная L_m , затрачивается на разрыв перемычек между предельно искаженными областями и приводит к аморфизации материала. Таким образом, в качестве лимитирующей составляющей удельной энергоемкости материала Δw при механическом воздействии можно принять энер-

гию H_T , а скрытую энергию L_m исключить из рассмотрения, полагая

$$\Delta w = \int_{T_0}^{T_s} (C_p \rho) dT.$$

Расчет удельной энергоемкости материала Δw через теплофизические свойства следует применять для определения показателя K при шлифовании, либо при методах окончательной (чистовой) лезвийной обработки, сопровождающихся образованием сливного типа стружки. С энергетических позиций сливное стружкообразование можно уподобить процессу расплавления материала, если толщина срезаемого слоя мала (до 0,1–0,5 мм), а скорость резания велика (приблизительно от 300 м/мин и выше).

Трактовку и определение величины Δw при методах предварительной (черновой) лезвийной обработки, характеризующихся значительными затратами энергии, можно проводить в зависимости от типа образующейся стружки, поскольку тип стружки обусловлен механизмом и интенсивностью деформации материала срезаемого слоя.

За образование стружки надлома при резании твердых материалов ответственны нормальные напряжения растяжения, поэтому удельную энергоемкость обрабатываемого материала Δw примем равной максимальной плотности работы этих напряжений:

$$\Delta w = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \approx \frac{1}{2} \sigma_b \delta,$$

где σ_b , ε_p , δ – соответственно временное сопротивление, критическое значение относительной деформации, относительное удлинение обрабатываемого материала при растяжении.

При резании пластичных материалов с образованием суставчатого типа стружки величину Δw примем равной максимальной плотности работы касательных напряжений в условной плоскости сдвига:

$$\Delta w = \tau_p \varepsilon = \frac{1,5 \sigma_b}{1 - 1,7 \psi_b},$$

где $\tau_p = \frac{0,6 \sigma_b}{1 - 1,7 \psi_b}$ – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу; ψ_b – равномерное относительное поперечное сужение.

Уравнения показателя энергетической эффективности K были получены для наиболее распространенных методов лезвийной обработки сталей, чугунов и цветных конструкционных сплавов [2–4]. Результаты исследований

свидетельствуют о том, что показатель K , определяемый по формуле (1), отвечает всем требованиям, предъявляемым к критериям оптимальности технологических процессов: во-первых, показатель K выражает КПД процесса резания и, следовательно, обладает физическим смыслом; во-вторых, он просто и однозначно описывается в математическом виде; в-третьих, он может быть сведен к виду целевой функции $K \rightarrow \max$, аргументами которой являются показатели физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры инструмента и срезаемого слоя, элементы режима резания. Таким образом, при оптимизации процессов обработки резанием по энергетическому критерию K в рассмотрение включается большое число управляемых факторов.

С помощью показателя K можно количественно оценить эффективность альтернативных технологических вариантов и выбрать наиболее эффективный вариант: назначить тип и геометрию инструмента, элементы режима резания, условия осуществления процесса резания, соответствующие максимальному значению показателя K .

Выполнение условия $K \rightarrow \max$ при методах предварительной механической обработки способствует установлению таких условий реализации и параметров процесса резания, которые за счет минимально необходимого уровня энергетических затрат обеспечат наибольшую производительность и требуемую стойкость режущего инструмента.

При методах окончательной механической обработки по условию $K \rightarrow \max$ можно выбрать условия реализации и параметры процесса резания, обеспечивающие за счет минимально необходимого уровня энергетических затрат достижение заданного качества обработанных поверхностей.

Сделаем следующие выводы:

1. Решение задачи повышения энергоэффективности металлообрабатывающего оборудования включает три составляющие: снижение энергетических затрат в зоне резания; снижение энергетических потерь в трансмиссии; снижение энергетических потерь в электродвигателях. Снижение энергетических затрат в зоне резания при обеспечении требуемых результатов обработки может быть достигнуто на основе методики оптимизации условий реализации и параметров процесса резания по критерию наибольшего «энергетического КПД».

2. «Энергетический КПД» резания представлен в виде отношения полезной энергетической составляющей к общей удельной работе резания. Полезная энергетическая составляющая имеет разную трактовку для методов предварительной и окончательной обработки: в первом случае в качестве полезной энергетической составляющей принята удельная работа напряжений резания, во втором случае – энтальпия плавления.

3. Удельную работу резания следует рассчитывать с учетом изменения мощности резания в течение времени стружкообразования. Предложены четыре типовые схемы изменения мощности резания.

4. Показатель K отвечает всем требованиям, предъявляемым к критериям оптимальности технологических процессов, и может быть использован в системах адаптивного управления процессом резания в целях уменьшения энергоемкости изготовления деталей машин в условиях автоматизированных производств.

Список литературы

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.

2. Карпов А.В., Албагачиев А.Ю. Оценка эффективности эксплуатации режущих инструментов с использованием безразмерных энергетических критериев // Сборник научно-практической конференции Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: сб. тр. науч.-практ. конф. / МГАПИ. – М., 2004.

3. Карпов А.В., Игнатов С.Н., Распопин А.П. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия // СТИН. – 2004. – № 12.

4. Карпов А.В., Распопин А.П., Лазуткина Н.А. Показатели энергоэффективности проектируемых и действующих технологических процессов машиностроительных производств // Механика и процессы управления: тр. XXXII Уральского семинара / Уральское отделение РАН. – Миасс, 2002.

5. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

Получено 3.02.2012