

ЕКОНОМІКА ТА ЕКОЛОГІЯ

УДК 621.002.02

В.С. ГУСАРЕВ, канд. техн. наук,
А.Б. КАДХИМ, Одесса, Україна

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ НА ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Енергетичні витрати на виробництво виробів машинобудування. Розглянуто технологічні операції, зазначені енергетичні показники, які являють собою характеристику питомої роботи, як відношення витраченої енергії до одиниці об'єму, деформованого матеріалу в певній операції.

Энергетические затраты на производство изделий машиностроения. Рассмотрены технологические операции, указаны энергетические показатели, которые представляют собой характеристику удельной работы, как отношение затраченной энергии к единице объема, деформируемого материала в определенной операции.

Energy costs for the production of engineering products. Technological operations, specified energy performance, which represent characteristics of specific works, as the ratio of energy expended per unit of volume, of a deformable material in a particular operation.

Технология машиностроения содержит большой спектр физических процессов, начиная от обработки металлов давлением (ОМД), резанием (ОМР), до физических и химических процессов (ФХОМ) воздействия на вещество (материал). Основным показателем этих процессов, несмотря на их физическое разнообразие, является время (t) или обратная величина – производительность (t^{-1}). Как физическая категория время – длительность (период) протекания процесса, а производительность – частота, с которой производится продукт технологического процесса, иначе скорость выпуска технологической продукции.

Время, как основной технологический показатель, является

необходимым для анализа и синтеза процессов, но не достаточным его показателем. Любой физический (химический) процесс, положенный в основу технологического процесса (операции) для выполнения технологического воздействия, требует затраты работы и её меры энергии.

Работа и ее эквивалент – энергия является необходимым и достаточным показателем технологического процесса (операции) вне зависимости от физического содержания.

Удельная работа (энергия) процесса - это энергия (Дж), необходимая для выполнения работы над единичным объемом материала ($см^3$). Удельная энергия процесса характеризует технологический процесс по расходу энергоресурса. Основные операции технологических процессов существенно различаются по удельной энергии (Дж/ $см^3$). Эту особенность различных процессов обработки обнаружили многие исследователи различных процессов. Этот, как правило сопутствующий результат исследований не привлекал внимания, т.к. лежал вне области решаемой задачи.

Удельная работа (энергия) физического процесса (операции) определена интервалом значений, который зависит от обобщенных физико-механических характеристик обрабатываемых материалов в данном конкретном процессе. Нижняя граница интервала соответствует менее высоким, а верхняя – более высоким характеристикам материала

Впервые подобные статистические показатели удельной работы, как характеристики технологической операции были приведены в статье д.т.н. В.В. Швеца еще в 1967 году [1]. В этой статье предлагалось рассматривать идеальные технологические процессы, исходя из атомно-молекулярного подхода к скорости процессов разрушения вещества. Автор сосредоточил внимание на двух скоростных зонах предельного состояния деформированного вещества.

Первая зона – с предельной скоростью деформации, равной скорости звука, вторая – с предельной скоростью деформации равной скорости света. Далее, автор предложил двухкоординатную таблицу «удельная энергия – скорость процесса», которая, к сожалению, не стала «таблицей Менделеева».

Таблица 1

Наименование операции	Удельная работа a , (Дж/см ³)
1.Холодная листовая гибка	5...10
2.Холодная гибка проф.(труб) на роликах	20...40
3.Штамповка на гидравлических прессах	20...60
4.Штамповка взрывом	20...76
5.Горячая штамповка без нагрева	60...80
6.Волочение проволоки	66...70
7.Волочение труб без оправки	$(2,1...2,7) \cdot 10^2$
8.Волочение труб с оправкой	$(5 \dots 6,0) \cdot 10^2$
9.Холодная резка на ножницах	$(4 \dots 5,1) \cdot 10^2$
10.Обдирка однопроходная	$(4 \dots 5,5) \cdot 10^2$
11.Выдавливание холодное	$(5,5...8,5) \cdot 10^2$
12.Высадка холодная	$(5,6 \dots 14) \cdot 10^2$
13.Резание баллистическое	$(1,0...1,3) \cdot 10^3$
14.Точение	$(1,7...2,5) \cdot 10^3$
15.Протягивание	$(2,5...4,0) \cdot 10^3$
16.Зенкерование	$(3,0...4,8) \cdot 10^3$
17.Сверление	$(1,0...6,2) \cdot 10^3$
18.Фрезерование	$(5,0...7,5) \cdot 10^3$
19.Развертывание	$(1,2...3,0) \cdot 10^4$
20.Шлифование	$(5,1...7,5) \cdot 10^4$
21.Электроконтактная обработка	$(0,3...1,2) \cdot 10^5$
22.Электрохимическое шлифование	$(1,4...5,8) \cdot 10^5$
23.Электрохимическое полирование	$(2,2...4,3) \cdot 10^5$
24.Электронно-лучевая обработка	$(2,4...5,8) \cdot 10^5$
25.Электроимпульсная обработка	$(3,5...7,0) \cdot 10^5$
26.Ультразвуковая	5...10
27.Электроискровая	20...40

В заключение автор сформулировал основные требования к идеальным процессам обработки:

1. В основу процесса должны быть положены электрические или световые явления, так как только они обладают способностью создавать сверхзвуковые скорости.

2. Энергия, необходимая для процесса обработки, должна вводиться непосредственно в рабочую зону, минуя всевозможные передаточные звенья и преобразования.

3. Энергия должна направляться на нарушение и ослабление минимально необходимого количества связей, затрагивая ближайших слоев обрабатываемого материала».

Наш интерес к удельной работе технологической операции позволяет рассмотреть вопрос с нескольких направлений

1. Расставить технологические процессы по возрастанию показателя удельной работы, что позволяет проследить тенденцию развития процессов.

2. Классифицировать процессы механической обработки именно по удельным энергетическим показателям.

3. Исследовать наиболее перспективные направления в технологии обработки материалов

4. Сопоставить альтернативные процессы, обеспечивающие одинаковый результат качества, но различающихся по удельным характеристикам.

5. Проектировать такие варианты процессов обработки, которые будут иметь минимальную энергоемкость.

6. Стимулировать инновационную модернизацию технологических производств с целью более экономного расходования энергии на решение технологических задач.

Основная тенденция развития процессов механической обработки материалов представлена графиком, который характеризует три класса операций, четко фиксированных в общем массиве процессов. В первую очередь это процессы обработки давлением (ОМД), которые имеют интервал удельной работы $[Дж/см^3]: a = (5 \cdot 10^2 \cdot \dots \cdot 5,5 \cdot 10^2)$; во вторую – процессы обработки металлов резанием (ОМР) с интервалом удельной работы $a = (2 \cdot 10^3 \cdot \dots \cdot 1,5 \cdot 10^4)$; третью – процессы обработки материала

физическими и химическими методами (ФХОМ) с интервалом удельной работы $a = (3 \cdot 10^4 \cdot \dots \cdot 5 \cdot 10^7)$.

Предлагаемая классификация, с одной стороны широко известна, т.к. в качестве одного её признака выдвигается различное инструментальное взаимодействие, как у проф. Г.И. Грановского – кинематическая классификация, или как у академика Л.Н. Кошкина – геометрическая классификация процессов; с другой стороны здесь предлагается классификация процессов по признаку (интервалу) удельной работы.

Основные классы ОМД, ОМР, ФХОМ технологических процессов существенно различаются по удельной энергии [$\text{Дж}/\text{см}^3$]. Как видно из приведенных данных таблицы и графика наиболее экономичные процессы ОМД – холодная гибка листов (производство кузовов автомобилей), штамповка взрывом (бесшовное производство емкостей техники). Достаточно экономичные процессы ОМР в традиционных операциях точения (обработка тел вращения) и протягивания (обработка плоскостей корпусов). Совершенно неэкономичные процессы ФХОМ – ультразвуковая и лазерная обработка. Эти процессы специального назначения, необходимые для обработки сверхтвердых материалов[2, 5, 6, 7, 8, 9].

Удельный показатель работы (энергии) в технологическом процессе можно использовать при определении общей работы (энергии) на выполнение технологической операции.

Так, например, холодная гибка на роликах труб из алюминия $a_{ал} = 20$, а из стали $a_{ст} = 40$, что приводит к двукратной экономии энергии на производство изделий, при одинаковом их функциональном применении. Здесь не учитываются затраты (стоимость) на различные материалы, а иллюстрируются энергетические особенности одного и того же процесса в определении интервала удельных энергетических затрат. Это лишь один из многих примеров того, что на производство алюминия в последнее время обращено чрезвычайное внимание.

$$A = a \cdot \Delta V \quad (2)$$

для процессов ОМР и ФХОМ, т.к. воздействию подвергается не весь объем, а его часть $\Delta V = V_3 - V_0$.

Используя условие одинакового объема преобразования для различных по технологическому (и физическому) содержанию процессов, можно произвести их сравнение по энергетическим затратам.

Сравним финишную обработку изделия, выполненного из одного и того же материала, имеющего определенный припуск на обработку двумя альтернативными методами (процессами) - круглым шлифованием и тонким точением:

$$A_{ш} = a_{ш} \cdot \Delta V_{ш}, \quad A_m = a_m \cdot \Delta V_m \quad (3)$$

Из условия равных объемов $\Delta V_{ш} = \Delta V_m$ после элементарных преобразований получим: $\frac{A_{ш}}{a_{ш}} = \frac{A_m}{a_m}$ или $\frac{A_{ш}}{A_m} = \frac{a_{ш}}{a_m}$,

но $a_{ш} = (5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4$, $a_m = (1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3$, т.е.

$$\frac{A_{ш}}{A_m} = \frac{(5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} = 30$$

Таким образом, процесс тонкого точения в 30 раз менее энергоемок, чем процесс шлифования при снятии одинакового припуска. Возможно, столь большая величина энергозатрат при шлифовании вызовет удивление? Однако напомним, что «удельная» энергия зависит от соотношения процесса трения, царапания и резания, являющихся составными элементами шлифования. Сравнение этих двух процессов в технологической практике (литературе) не анализировалось и обсуждению не подвергалось. Рассмотрим другой пример. Обработка шлицевых валов обычно выполняется в две операции ОМР, первая – фрезерование, вторая – шлифование. Если производить накатку роликами, т.е. перейти к операции ОМД, то сравнивая затраты энергии получим:

$$a_{\phi} = (5,0 \dots 7,5) \cdot 10^3; \quad a_{\text{ш}} = (5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4, \quad a_{\text{омд}} = (5,5 \dots 8,5) \cdot 10^2$$

$$\frac{A_{\text{ш+}\phi}}{A_{\text{омд}}} = \frac{(5,0 \dots 7,5) \cdot 10^3 + (5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(5,5 \dots 8,5) \cdot 10^2} = 110,90$$

Таким образом, получаем более чем стократное различие затрат энергии. Естественно, эти расчеты приблизительные, но все же указывают на направление работы исследователей.

Сравнение и выбор технологических решений на основе энергетического критерия. При производстве изделий с участием рабочего энергия на выполнение технологической операции складывается из суммы затрат энергии: рабочего (\mathcal{E}_p), собственно процесса обработки (\mathcal{E}_n) и частично переносимой «аккумулятивной», или вложенной в прошлом энергии на производство оборудования (\mathcal{E}_m), т.е.

$$\mathcal{E}_{\text{оп}} = \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_m, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_p = t_p \cdot P_p$, $\mathcal{E}_n = t_n \cdot P_n$, $\mathcal{E}_m = t_m \cdot (P_m + m \cdot \frac{e}{T})$, t_p – время работы рабочего, P_p – «мощность» рабочего, t_n – машинное время, P_n – мощность станка, расходуемая на процесс обработки, m – масса (усредненная) оборудования, T – ресурс эксплуатации оборудования, e – энергосодержание (аккумулятивная энергия) оборудования.

Если сравниваемые технологические операции различаются только применяемым оборудованием, т.е. $\mathcal{E}_p^{(1)} = \mathcal{E}_p^{(2)}$; $\mathcal{E}_n^{(1)} = \mathcal{E}_n^{(2)}$, то достаточно сравнивать по $\mathcal{E}_m^{(1)}$ – первого и $\mathcal{E}_m^{(2)}$ – второго варианта.

Энергоэкономический эффект (ЭЭФ) от применения прогрессивного оборудования по сравнению с исходным [2]:

$$\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_m^{(1)} - \mathcal{E}_m^{(2)} \quad \text{или}$$

$$\Delta \mathcal{E}_m = t_m^{(1)} (P_m^{(1)} + m^{(1)} \cdot \frac{e^{(1)}}{T^{(1)}}) - t_m^{(2)} (P_m^{(2)} + m^{(2)} \cdot \frac{e^{(2)}}{T^{(2)}}).$$

Пример. Обработка крышки (ГОСТ 11641-73) по одинаковому процессу, но выполняемому на револьверном станке ИВ340Ф2 и на шестишпиндельном полуавтомате IA282Б. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

	ИВ340Ф2	IA282Б
$t_m (с)$	100	20
$P_m (Вт)$	6×10^3	20×10^3
$m (кг)$	$2,5 \times 10^3$	13×10^3
$T (с)$	$7,2 \times 10^7$	$7,2 \times 10^7$
$e \left(\frac{Вт}{кг}\right)$	2×10^7	$3,5 \times 10^7$
$E_m (Дж)$	7×10^5	$5,3 \times 10^5$

С учетом данных по затратам энергии на выполнение операций и на производство вещества материала (табл. 3, 4) экономия энергии на одно изделие при применении второго варианта будет: $\Delta \varepsilon_m = 7 \cdot 10^5 - 5,3 \cdot 10^5 = 1,7 \cdot 10^5$ Дж, при выпуске 1000 шт. составит ~ 50 кВт ч. Для получения результата сравнения в привычном денежном выражении можно воспользоваться «нефтяным» энергоэквивалентом: 1 кг (нефти) ~ 1 кВтч (энергии) ~ 5 \$ ~ 40 грн., тогда в приведенном примере ЭЭФ составит 10000 грн.

Таблица 3 – Затраты энергии на выполнение операции рабочим [10]

№	Вид работы	Энергозатраты, кДж/мин
1.	Механическая работа станочника	10,5.....19,3
2.	Механическая работа электрика	21,4.....23,1
3.	Работа слесаря	21,4.....30,1

Таблица 4 – Затраты энергии на производство вещества (материала) [4]

№	Вещество (материал)	Энергозатраты, МДж/мин
1.	Чугун	18.0
2.	Сталь	57.0
3.	Сталь прокат	80.0
4.	Цинк	90.0
5.	Медь	102.0
6.	Медь (матовая)	160.0
7.	Никель	700.0
8.	Титан	1100.0

Аналогичным образом возможно сравнивать сложные многооперационные процессы – варианты. Если изменяется физическое содержание операции, например, заменяется шлифование точением, то следует производить сравнение как по \mathcal{E}_m , так и по \mathcal{E}_n .

Список использованной литературы: 1. Швец В.В. Распределение технологических процессов по энергетическим уровням и скоростным зонам // Вестник машиностроения, 1967, № 10. – с.61-62. 2. Армареги И.Дж., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 327 с. 3. Гусарев В.С. Энергетическая эффективность технологических процессов // сб. Авиационно-космическая техника и технология, вып. 14 – Харьков.: ТАКУ им. Н.Е. Жуковского, 2000. – 420 с. 4. Янговский Е.И. Потoki энергии и эксергии. – М.: Наука, 1988. – 144 с. 5. Коваленко В.С. Лазерная технология. – К.: ВШ, 1989. – 280 с. 6. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации. / Хензель А., Шпиттель Т. // Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1985. – 184 с. 7. Обработка металлов давлением / Павлов И.М., Федосов Н.М., Северденко В.П. – М.: Металлургия, 1955. – 483 с. 8. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с. 9. Рыжов А.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с. 10. Амосов Н.М. Бендет Я.А. Физическая активность и сердце. К.; Здоровье, 1975. – 255с. 11. Гусарев В.С. Энергетические проблемы современной технологии машиностроения // Вестник инженерной академии, Киев, №3, 2007, с. 165-176.

Bibliography (transliterated): 1. Shvec V.V. Raspredelenie tehnologicheskikh processov po jenergeticheskim urovnjam i skorostnym zonam /Vestnik mashinostroenija, 1967, № 10. – s.61-62. 2. Armarego I.Dzh., Braun R.H. Obrabotka metallov rezaniem. - M.: Mashinostroenie, 1977. – 327 s. 3. Gusarev V.S. Jenergeticheskaja jeffektivnost' tehnologicheskikh processov // sb. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, vyp. 14 – Har'kov.: TAKU im. N.E. Zhukovskogo, 2000. – 420 s. 4. Jantovskij E.I. Potoki jenerгии i jekserгии. – M.: Nauka, 1988. – 144 s. 5. Kovalenko V.S. Lazernaja tehnologija. – K.:VSh, 1989. – 280 s. 6. Optimizacija rashoda jenerгии v processah deformacii. / Henzel' A., Shpittel' T. // Per. s nem. – M.: Metallurgija, 1985. – 184 s. 7. Obrabotka metallov davleniem / Pavlov I.M., Fedosov N.M., Severdenko V.P. – M.: Metallurgija, 1955. – 483 s. 8. Popilov L.Ja. Jelektrofizicheskaja i jelektrohimicheskaja obrabotka metallov. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 400 s. 9. Ryzhov A.V., Averchenkov V.I. Optimizacija tehnologicheskikh processov mehanicheskij obrabotki – K.: Naukova dumka, 1989. – 192 s. 10. Amosov N.M. Bendet Ja.A. Fizicheskaja aktivnost' i serdce. K.; Zdorov'e, 1975. -255s. 11. Gusarev V.S. Jenergeticheskie problemy sovremennoj tehnologii mashinostroenija// Vestnik inzhenernyj akademii , Kiev , N3,2007, s. 165 – 176.