

К вопросу оценки доли энергии, затрачиваемой на износ в условиях резания***А. А. Рыжкин, К. Г. Шучев, Д. В. Моисеев, Ф. А. Висторопская**

Рассмотрены основные каналы диссипации энергии в условиях трения и резания материалов. На основании известных экспериментальных данных показано, что не вся выделившаяся в этих процессах энергия расходуется собственно на процесс изнашивания с образованием частиц износа. Для расчёта характеристик трения и износа используется новый подход. Предложенные зависимости отличаются от известных тем, что в более полной мере учитывают долю энергии трения, «ответственную» за износ. Проанализированы известные подходы к оценке энергетического баланса при трении и резании. Сравнением энергетических (тепловых) затрат в макрообъёмах и на пятнах фактического контакта показана связь между поверхностной и поглощённой энергией материалов. В первом приближении оценена доля энергии трения, «ответственная» за износ.

Ключевые слова: баланс энергии трения; поглощённая энергия; интенсивность изнашивания; коэффициент энергии трения, «ответственный» за износ.

Введение. Процесс изнашивания инструментальных режущих материалов, в том числе твёрдых сплавов, сопровождается интенсивным тепловыделением, и высокие температуры в инструменте в принципе определяют протекание диффузионных и окислительных процессов и стойкость инструмента.

В теоретических формулах для расчёта интенсивности изнашивания в этих условиях должна быть учтена доля энергии, запасённой изнашиваемым объёмом материала (инструмента), в виде простых зависимостей, адекватно отображающих процесс трения и износа. Это имеет важное научно-практическое значение, так как позволяет априори оценить износостойкость материалов пары трения и прогнозировать её работоспособность.

1. Об энергетическом балансе процесса изнашивания в условиях трения и резания. Исследованиями пар трения и инструментальных режущих материалов [1, 2] установлено, что трение — диссипативный процесс. Суть его состоит в следующем. Работа сил трения затрачивается на изменение внутренней энергии изнашиваемого материала, упруго-пластические деформации, структурные и фазовые превращения и электромагнитное излучение [2]. Большая часть работы внешних сил превращается в тепловую энергию, источником которой в общем случае являются упруго-пластические деформации и структурно-фазовые превращения. Выделяемая в контакте тепловая энергия расходуется на протекание необратимых и обратимых процессов.

К необратимым процессам относятся:

- накопление тепла в микрообъёмах изнашиваемого материала;
- рассеивание тепла в среду;
- химические реакции в присутствии активных компонентов внешней среды;
- термодиффузия и сорбционные процессы;
- эффект Зеебека.

Обратимые — процессы превращения «тепловая энергия — электрическая энергия — тепловая энергия» в эффектах Пельтье и Томсона.

Одна из первых работ по изучению энергетического баланса процесса резания — исследование В. Д. Кузнецова [3]. Автор считает, что часть выделившегося тепла при механической обработке накапливается в деформируемом материале «в виде энергии упруго искажённых частей кристаллической решётки и свободной энергии, образующихся при деформации внутренних

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-01328/13).

поверхностей раздела». Эта доля энергии может достичь 15–20 % от общей работы деформирования (Г. И. Епифанов и П. А. Ребиндер [4]). Проведя калориметрические исследования процесса сверления технического алюминия в различных средах, авторы нашли, что доля работы резания, которая превращается в потенциальную энергию стружки, колеблется от 0,8 % до 9,3 % (в среднем $\sim 3\%$) и составляет ничтожную часть от общей работы резания. Эта доля ниже, чем при обычных процессах пластического деформирования, но, по утверждению авторов [4], «абсолютное значение удельной величины поглощённой энергии в случае резания должно быть, конечно, не меньше того, которое получено из обычных опытов по пластическому деформированию».

Проанализируем в связи с рассматриваемой проблемой данные, представленные в монографии М. М. Хрущёва и М. А. Бабицева [5]. На рис. 1 показаны результаты исследования интенсивности изнашивания и коэффициентов трения.

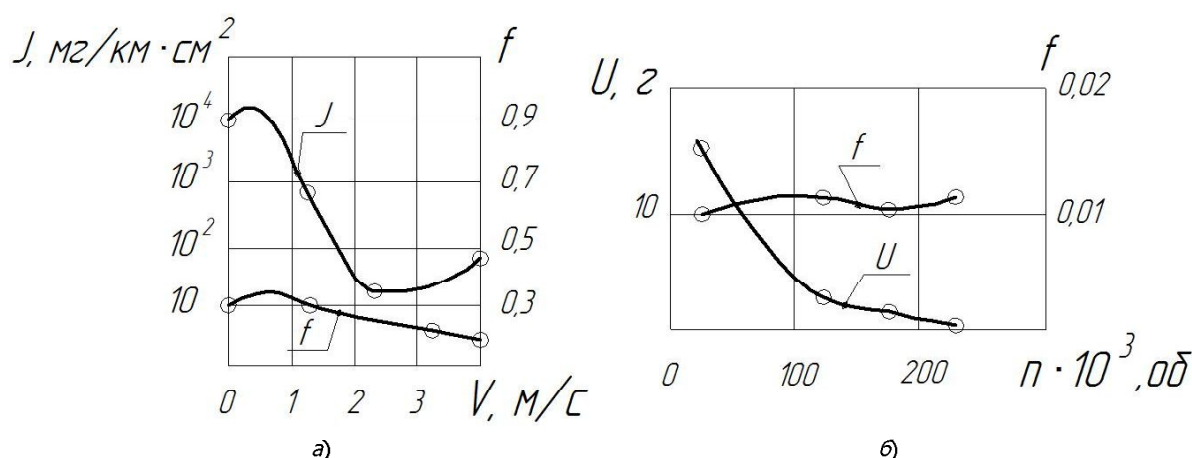


Рис. 1. Влияние скорости на характеристики трения и износа [5]: пара «чугун — чугун» (трение без смазки, $P = 10 \text{ кгс/см}^2$) (а); пара «свинцовая бронза — сталь» (со смазкой) (б)

Если внешние условия трения (V , P) постоянны, а путь (время) трения увеличивается, то интенсивность изнашивания падает до нуля. При этом коэффициент (а значит, и работа трения) не изменяется (рис. 1, б). Авторы [5] из-за отсутствия количественной связи между работой трения и интенсивностью изнашивания делают вывод, что «работа, затрачиваемая на разрушение металла при изнашивании, составляет ничтожную часть работы трения». С другой стороны, в других условиях трения (рис. 1, а), когда интенсивность изнашивания J при вариации скорости трения имеет конечную величину во всём диапазоне скоростей (кривая $J = f(V)$ на рис. 1, а), по мнению авторов [5], «работа, затрачиваемая на разрушение, составляет заметную часть общей работы трения». К сожалению, уровень этой «заметности» не оценён даже ориентировочно.

В. Д. Кузнецов [6] одним из первых сделал попытку выявить связь между характеристиками трения материалов и его поверхностной энергией как показателем энергетического состояния материала. При абразивном изнашивании кристаллов NaCl им было установлено, что, чем меньше поверхностная энергия, тем больше масса сошлифованного слоя при постоянной работе трения. В. Д. Кузнецов связал поверхностную энергию с прочностью материала:

$$\sigma = \frac{z^2 a}{2 \cdot E} \quad (1)$$

где σ — поверхностная энергия, z — прочность материала на сжатие, a — атомное расстояние, E — модуль упругости.

Так как $z = HB/2$ [7], то (1) примет вид:

$$\sigma = \frac{1}{8} \cdot \frac{(HB)^2 \cdot a}{E}, \quad (2)$$

где HB — твёрдость по Бринеллю.

В литературе появились более поздние данные по оценке поверхностного напряжения [7–9], в которых учитываются механические характеристики материалов (табл. 1, формула 2) и работы выхода электрона (табл. 1, формулы 3, 4). Из представленных зависимостей только формула Л. Л. Кунина даёт удовлетворительное согласие с экспериментальными данными для всех чистых металлов, кроме олова и ртути.

Таблица 1

Зависимости для оценки поверхностной энергии твёрдых тел

№	Формула	Автор	Примечание
1	$\sigma = \frac{z^2 a}{2 \cdot E}$	В. Д. Кузнецов [6]	z — прочность материала на сжатие; a — атомное расстояние; E — модуль упругости
2	$\sigma = \frac{\eta \cdot H^{\frac{1}{2}}}{\mu}$	Е. А. Трояновский [7]	H — микротвёрдость, $\eta = 1,35; 1,10; 1,65$ — для ГЦК, ГПУ и ОЦК решёток
3	$\eta = 444,5 \left(\frac{\phi}{r^2} \right) - 110$	Л. Л. Кунин [8]	ϕ — работа выхода электрона, r — атомный радиус
4	$\phi = 1,885 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sigma \cdot r^2}{z}$	В. В. Демченко, Н. Е. Хомутов [9]	

Приведённые данные по оценке поверхностной энергии (напряжения) не применимы для оценки энергетического состояния изнашиваемых в условиях трения при резании инструментальных материалов, имеющих гетерогенную структуру по следующим соображениям.

— Входящая в формулы табл. 1 работа выхода электрона ϕ для металлов зависит от физико-химического состояния поверхности металла, внешней среды и является трудновоспроизводимой характеристикой для многофазных структур, каковыми являются инструментальные режущие материалы.

— При оценке поверхностной энергии гетерогенной структуры, являющейся контактом двух металлических тел (например, карбид WC и связка Co в однокарбидном твёрдом сплаве), следует учитывать, что на образование новой поверхности затрачивается определённая энергия. Энергия такой двухфазной системы определяется [10] по классической зависимости

$$F = U - T \cdot S, \quad (3)$$

где F — свободная энергия системы, U — внутренняя энергия системы, S — энтропия, T — температура.

Если тела 1 и 2 разделены поверхностью 3, то их свободная энергия равна [10]

$$F_1 = U_1 - T \cdot S_1, F_2 = U_2 - T \cdot S_2 \text{ и } F_3 = U_3 - T \cdot S_3,$$

откуда их внутренняя энергия равна

$$U = (F_1 + F_2 + F_3) + T \cdot (S_1 + S_2 + S_3). \quad (4)$$

По этому соотношению можно оценить U (так как известны способы оценки потенциалов Гиббса, свободных энергий и энтропий компонентов системы по правилу аддитивности [10, 11]), но нельзя определить долю внутренней энергии материала, затрачиваемой на его разрушение при контактном взаимодействии в условиях трения. По этим причинам следует изыскивать кос-

венные, полученные экспериментально-расчётным способом методы оценки доли энергии трения, затрачиваемой непосредственно на образование частиц износа.

Значительный вклад в изучение энергетического баланса при трении внесли работы Б. И. Костецкого [12, 13], который предложил теорию механо-химического износа и ввёл понятия диссипативных вторичных структур. По Б. И. Костецкому, данный подход может быть описан первым законом термодинамики в виде (обозначения — по Б. И. Костецкому):

$$A = Q + \Delta E, \quad (5)$$

где A — работа внешних сил; Q — тепловой эффект, связанный с деформацией при внешнем трении; ΔE — изменение внутренней (поглощённой) энергии.

Исследовался процесс трения различных пар в среде вазелинового масла, и баланс оценивали калориметрическим методом. Режимы трения: $V = 0,34$ м/с; $I = 1000$ м; $P_1 = 6$ кгс/см²; $P_2 = 34$ кгс/см². В табл. 2 приведены полученные результаты.

Таблица 2

Энергетический баланс при трении, $(\Delta E/A) \cdot 100 \%$

№	Пара трения	Давление	
		$P_1 = 6$ кгс/см ²	$P_2 = 34$ кгс/см ²
1	АМцМ — АМцМ	7,3	—
2	Cu — Cu	4,6	7,6
3	Fe — Fe	2,46	5,7
4	Ст45 — Ст45 (отожж.)	1,46	3,3
5	Ст45 — Ст45 (закалён.)	0	0

Как видно из табл. 2, отношение поглощённой энергии ΔE к работе внешних сил A ($\Delta E/A$) зависит от механических свойств материала и давления и не превышает 7,6 %. С ростом давления доля поглощённой энергии увеличивается почти в два раза.

Изменение Q и ΔE оказывает влияние на количественные характеристики процесса трения и износа. Б. И. Костецкий считает, что поглощённая энергия упрочняет поверхностные слои металла, увеличивает износостойкость и снижает силы трения. В других случаях поглощение энергии отрицательно влияет на процесс трения и может привести к развитию явлений схватывания и заедания. Существует критическая величина поглощённой энергии, вызывающая эти явления.

Оптимальный уровень поглощённой при трении энергии может быть обеспечен [14] соответствующим выбором материалов пары трения, допустимых нагрузок и скоростей и работающих сред. В этом случае образуются защитные вторичные структуры, минимизирующие износ. Силы и коэффициенты трения при этом остаются постоянными [14]. В итоге протекание нормального механохимического износа определяется условием:

$$\Delta E / A \rightarrow \min. \quad (6)$$

Б. И. Костецким получены важные, принципиально новые данные о прогнозировании поведения пары трения с учётом условия (6). Однако в работах [12–14] не установлено, какая доля внутренней (поглощённой) энергии трения затрачивается на образование частицы износа.

В связи с рассматриваемой проблемой необходимо остановиться на систематическом обзоре выполненных за последние годы исследований энергетического баланса процесса резания — в частности, по оценке доли тепла, поступающего в режущий инструмент.

А. М. Даниелян [15], ссылаясь на работы В. Д. Кузнецова и Н. Ф. Кунина, отмечает, что по аналогии с пластическим сжатием «около 15–20 % всей работы переходит в скрытую поглощённую энергию изменения кристаллической решётки». По данным Б. Т. Прутова и С. С. Можаяева

(цитируем по [15]), при точении стали быстрорежущим резцом на скоростях 9–45 м/мин в резец может уходить 2–3,5 % всего тепла (Б. Т. Прутков); при обработке стали 40 резцом из Т15К6 на скоростях 30–300 м/мин резец поглощает 1,7–0,3 % (С. С. Можаяев). В более поздних работах А. М. Даниелян [16, 17] изучал тепловой баланс не только при резании углеродистых сталей, чугуна, цветных металлов, но и труднообрабатываемых материалов (табл. 3).

В МАТИ (Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского) [18] изучали тепловой баланс при резании авиационных материалов и установили следующее. При точении Ст45 резцом из Т15К6 ($\alpha = 12^\circ$, $\varphi = 45^\circ$) на режимах $t = 2$ мм, $S = 0,2$ мм/об при вариации скорости резания от 0,1 м/с до 3,9 м/с процент переходящего в резец тепла изменялся от 8 % до 1 %, причём увеличивался с ростом скорости резания. При точении титанового сплава ВТ3-1 резцом из ВК8 ($\gamma = 12^\circ$, $\varphi = 45^\circ$) на режимах $t = 2$ мм, $S = 0,2$ мм/об доля тепла в резец изменялась от 2,5 % до 1,9 %, если скорость резания изменялась от 0,08 м/с до 3,0 м/с. В учебниках по обработке материалов резанием [19, 20] отмечается, что количество тепловой энергии, аккумулированной в теле резца при обработке Ст45 резцом Т15К6, невелико, и с ростом скорости резания уменьшается от 5 % до 2 %. Доля тепла, переходящего в инструмент при точении твердосплавными резцами, изучалась в Белорусском техническом университете [21]. Установлено, что этот показатель для обработки алюминия, чугуна, 40Х и Ст45 не отличается от данных [16, 17] (табл. 3). Для титанового сплава ($V = 35$ м/мин, $t = 4$ мм, $S = 0,3$ мм/об) доля тепла, переходящего в инструмент, равна 9,8 %, а для спечённой стали ($V = 100$ м/мин, $t = 0,1$ мм, $S = 0,08$ мм/об) — 17 % (резец из композита 10).

Таблица 3

Доля тепла, поступающего в инструмент

№ п/п	Материал		Режимы резания	Доля тепла (работы резания), уходящего в инструмент, %	Источник
	Деталь	Инструмент			
1	2	3	4	5	6
1	Ст45 40Х чугун ВТ-2 40Х	— — — —	$V = 40\text{--}60$ м/мин — — $V = 20\text{--}50$ м/мин $V = 100\text{--}350$ м/мин	7,9–3,5 1,9 20,0 4,5 1,6	[18]
2	Сплав АК4 Алюминий		$V = 100$ м/мин $V = 200$ м/мин $V = 100$ м/мин	1,5 1,0 2,2	[17]
3	ВТ-2	ВК8 $\gamma = 10^\circ$, $\gamma_\phi = -5^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi = 45^\circ$	$V = 5$ м/мин $V = 10$ м/мин $V = 20$ м/мин $V = 30$ м/мин $V = 40$ м/мин $V = 50$ м/мин $V = 60$ м/мин	35 31 23 19 13 12 10	[17]
4	Ст45 ЭИ827 ЭИ867 ВЛ7-454 ВЖ36-Л2	ВК8 $\gamma = 10^\circ$, $\gamma_\phi = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$	$V = 10$ м/мин $t = 1,5$ мм; $S = 0,12$ мм/об	8 26 28 20 25	[17]

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
5	Молибденовый сплав ВМ1	ВК8	$t = 1,5 \text{ мм};$ $S = 0,12 \text{ мм/об}$ $V = 5 \text{ м/мин}$	15,3	[17]
			$V = 15 \text{ м/мин}$	14,2	
			$V = 20 \text{ м/мин}$	11,8	
			$V = 30 \text{ м/мин}$	10,2	
			$V = 50 \text{ м/мин}$	10,1	
	Ниобиевый сплав НИ-13	Р18	$V = 20 \text{ м/мин}$	9,8	[17]
			$V = 40 \text{ м/мин}$	9,35	
			$V = 60 \text{ м/мин}$	6,25	
			$V = 80 \text{ м/мин}$	5,5	
	Вольфрамовый сплав	ВК8	$V = 5 \text{ м/мин}$	23,5	[17]
			$V = 10 \text{ м/мин}$	15,7	
			$V = 15 \text{ м/мин}$	17,2	
			$V = 20 \text{ м/мин}$	21,9	
			$V = 30 \text{ м/мин}$	16,5	

Представленные данные по оценке доли тепловой энергии, аккумулированной режущим инструментом, позволяют утверждать следующее.

1. При трении одноимённых пар отношение поглощённой энергии к работе трения колеблется от 1,46 % до 7,6 %, причём с увеличением давления доля поглощённой энергии увеличивается почти в 2 раза (табл. 2).

2. При токарной обработке углеродистых сталей 40, 40Х, 45 доля поглощённой энергии колеблется от 1,6 % до 8 %; алюминиевых сплавов — 1,0–2,2 %; чугуна — 1,9 %; титанового сплава ВТ-2 — 10–35 %; жаропрочных сталей — 20–28 %; молибденового сплава ВМ-1 — 10,1–15,3 %, ниобиевого сплава НИ-13 — 5,5–9,8 %; вольфрамового сплава — 16,5–25,5 %.

3. С ухудшением теплопроводности материала инструмента доля тепла возрастает. С увеличением скорости резания доля тепла в инструмент снижается (см. № 1–3, 5 табл. 3).

4. Часть тепла резания накапливается в деформируемом материале в виде энергии образующихся при деформации внутренних поверхностей раздела. Работа, затрачиваемая на разрушение металла при изнашивании, в определённых условиях трения может составлять ничтожную или заметную часть работы трения [4].

Последний тезис указывает на необходимость поиска показателей, адекватно отражающих энергетическую обстановку в зоне резания, имеющих чёткий физический смысл, легко определяемый экспериментально-расчётными методами.

2. Обоснование термодинамического показателя для оценки доли тепловой энергии, затрачиваемой на образование частицы износа при резании. Применительно к процессу изнашивания твёрдых сплавов и других инструментальных режущих материалов (ИРМ) с известными механическими и физико-химическими свойствами надо учитывать превалирующее влияние тепловых процессов. Как было неоднократно показано [1, 2], тепловое состояние ИРМ определяется не только средней температурой контакта T , величиной $\text{grad } T$ и зоной его действия, но и температурой на пятнах фактического контакта (температурой вспышки).

Тепловое поле в инструменте формируется суммированием температур на пятнах фактического контакта (температур вспышки $T_{\text{в}}$) и в поверхностных слоях (T), а температура контакта будет равна сумме этих температур. Такой подход эффективно используется при изучении тепловой динамики трения и износа деталей машин [22] и оказался эффективным при изучении тепло-

вого состояния режущего инструмента [2]. Было установлено, что T_b определяет производство избыточной тепловой энтропии на пятнах фактического контакта, а T — производство энтропии в макрообъёмах [2].

Кроме этого, отношение $k_T = T_b / T$ (или его экспериментальный аналог $k_\varepsilon = \tilde{\varepsilon} / E$, где $\tilde{\varepsilon}$ — переменный сигнал ТЭДС, формируемый на пятнах фактического контакта, E — термо-ЭДС пары трения) оказалось эффективным критерием выбора оптимального режима трения и резания [23]. Нашими многочисленными экспериментами по изучению вариации параметра $k_\varepsilon = \tilde{\varepsilon} / E$ для различных видов обработки резания установлено, что отношения температур T_b / T и их электрических аналогов $\tilde{\varepsilon} / E$ при изменении режимов резания находятся в определённых пределах [1, 2]. В табл. 4 сведены результаты наших многочисленных исследований по этому вопросу.

Анализ данных табл. 4 показывает следующее.

1. Для всех операций обработки резанием с увеличением скорости резания и подачи параметр k_ε уменьшается, что связано, по-видимому, с увеличением фактической площади контакта и температуры резания.

2. При резании углеродистых сталей величина параметра k_ε изменяется в пределах 0,12–6 %. Для обработки титанового сплава BT3-1 $k_\varepsilon = 6,8$ –12,5 %.

3. С ухудшением теплопроводности обрабатываемых материалов (титановый сплав BT3-1) коэффициент k_ε возрастает по сравнению с обработкой углеродистой стали 45 в 5–10 раз (данные в табл. 4, № 1 и 3, для сплава BK8 при $S = 0,11$ мм/об). Для титановых, жаропрочных, молибденовых, ниобиевых и вольфрамовых сплавов доля тепла, поступающего в инструмент, как видно из табл. 3, достигает максимальных значений порядка 10–30 % и в 4–5 раз выше, чем при точении углеродистой стали.

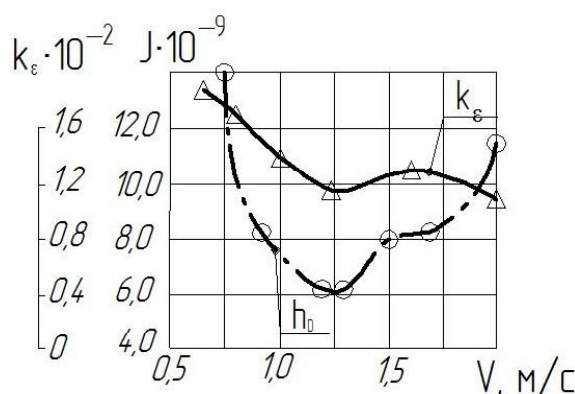


Рис. 2. Точение 1X18H9Т — BK8, $S = 0,21$ мм/об, $t = 0,5$ мм

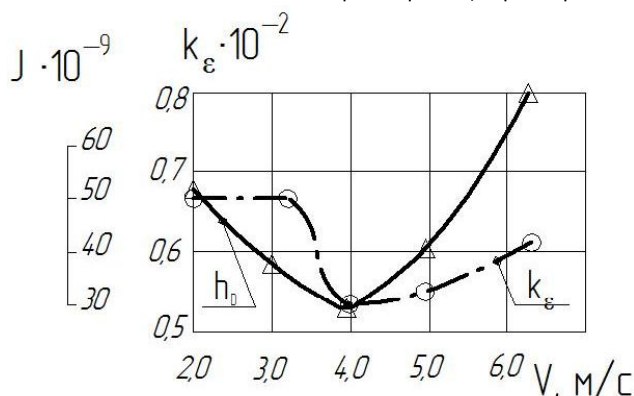


Рис. 3. Фрезерование Ст45 — T15K6, $S = 0,15$ мм/зуб, $t = 2$ мм

Таблица 4

Экспериментальные результаты оценки параметра $k_e = \tilde{\varepsilon} / E$ при обработке резанием на различных операциях

№ п/п	Опера-ция	Материал пары «инструмент — деталь»	Режимы резания			$k_e = \tilde{\varepsilon} / E$, %
			t , мм	S , мм/об	Диапазон скоростей, м/с	
1	2	3	4	5	6	7
1	Точение	Ст45 — Т15К6	0,5	0,11	1,25–2,6	0,5–0,21
		Ст45 — Т15К6+TiC	0,5	0,11	1,25–2,6	0,57–0,12
		Ст45 — ВК8	0,5	0,11	1,25–3,4	1,9–1,0
		Ст45 — ВК8+TiN	0,5	0,11	1,25–5,4	0,85–0,24
		Ст45 — ВК8+Cu	0,5	0,11	1,25–4,3	1,2–0,42
2	Точение	1Х18Н9Т — ВК8	0,5	0,11	0,64–2,0	2,52–2,0
			0,5	0,21	0,64–2,0	1,9–2,0
			0,5	0,3	0,64–2,0	1,55–1,0
3	Точение	ВТ3-1 — ВК8	0,25	0,11	0,42–2,28	9,0–10,0
		ВТ3-1 — ВК8+Cu	0,25	0,11	0,42–2,28	12,0–12,5
		ВТ3-1 — Т15К6	0,25	0,11	0,42–2,28	9,7–12,0
		ВТ3-1 — Т5К10	0,25	0,11	0,42–2,28	7,8–8,5
		ВТ3-1 — Т5К10+TiC	0,25	0,11	0,42–2,28	9,5–6,8
4	Точение	СЧ18 — ВК8	2,0	0,21	0,78–3,2	8,0–3,7
		СЧ18 — ВК8+TiN	2,0	0,21	1,26–3,2	6,9–5,1
		СЧ18 — Т15К6	2,0	0,21	0,78–3,2	8,7–5,2
		СЧ18 — Т15К6+(TiC+TiN)	2,0	0,21	1,26–3,2	9,8–6,9
5	Точение	20Х — Р6М5	0,25	0,11	0,52–1,65	6,0–3,1
6	Точение	Ст35 — ВК8	0,5	0,07	1,4–3,3	2,6–0,9
			0,5	0,21	1,4–3,3	0,83–2,29
			0,5	0,07	0,7–5,7	4,9–1,0
			0,5	0,14	0,7–5,7	4,2–0,76
		Ст35 — Т15К6+TiN	0,5	0,3	0,7–5,7	1,96–1,61
			0,5	0,07	1,3–5,0	3,2–0,85
			0,5	0,14	1,3–5,0	3,8–0,76
			0,5	0,3	1,3–5,0	1,7–1,5
7	Торцевое фрезерование	Ст45 — Т15К6	$\phi 125$ мм $t = 2$ мм	$S_z = 0,15$ мм/зуб	2,0–6,4	0,67–0,61
8	Сверление	Ст45 — Р6М5	$\phi 10,2$ мм	0,06	0,15–0,7	1,0–0,62
				0,165	0,15–0,7	0,76–0,65
				0,28	0,15–0,7	0,72–0,8
9	Сверление	Ст45 — Р18	$\phi 10,2$ мм	0,28	0,15–0,7	2,2–1,2
		Ст45 — Р6Ф4М4		0,28	0,15–0,7	0,4–0,45
		Ст45 — Р6М5К5		0,28	0,15–0,7	1,1–0,72
		Ст45 — ЭП657		0,28	0,15–0,7	2,2–1,5

Сравнивая данные табл. 3 по доле тепловой энергии, поступающей в инструмент (графа 6), с данными графы 7 табл. 4, в расчётных величинах критерия $k_\varepsilon = \tilde{\varepsilon} / E$ для аналогичных условий обработки можно увидеть удовлетворительное их соответствие по порядку величины. Данные граф 2 и 7 представлены на рис. 2 и 3.

Заключение. Сравнивались доли тепловой энергии, поступающей в инструмент, и показатель, характеризующий отношение температур на пятнах фактического контакта T_b к поверхностной (объёмной) температуре T ($k_T = T_b / T$). Полученные данные свидетельствуют об общности теплофизических процессов в этих случаях. Имеет место количественное совпадение значений этих двух показателей по порядку величины.

При достижении минимума отношения поглощённой изнашиваемым материалом энергии к общим энергетическим затратам на процесс ($\Delta E / A \rightarrow \min$) предложенное Б. И. Костецким термодинамическое условие минимума износа подтверждается нашими экспериментальными данными, когда минимуму показателя $k_\varepsilon = \tilde{\varepsilon} / E$ ($k_T = T_b / T$) соответствует минимальное значение интенсивности изнашивания [2].

Поэтому условия оптимизации процесса изнашивания $\Delta E / A \rightarrow \min$ и $T_b / T \rightarrow \min$ имеют одну природу, связанную с изменением механизма изнашивания в области минимальных значений этих параметров.

Введённый нами в уточнённую формулу интенсивности изнашивания [24] показатель $k_T = T_b / T$ и его экспериментальный аналог $k_\varepsilon = \tilde{\varepsilon} / E$ имеют термодинамический смысл и в первом приближении соответствуют доле энергии, затрачиваемой на образование части износа.

Библиографический список

1. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: физические основы / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 1995. — 242 с.
2. Рыжкин, А. А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 2005. — 311 с.
3. Кузнецов, В. Д. Физика твёрдого тела / В. Д. Кузнецов. — Томск: Полиграфиздат, 1947. — Т. 4. — 542 с.
4. Епифанов, Г. И. Об энергетическом балансе процесса резания металлов / Г. И. Епифанов, П. А. Ребиндер // Докл. Акад. наук СССР. — 1949. — Т. 66, № 4. — С. 32–40.
5. Хрущов, М. М. Исследования изнашивания металлов / М. М. Хрущов, М. А. Бабишев. — Москва : Изд. центр Акад. наук СССР, 1960. — 351 с.
6. Кузнецов, В. Д. Поверхностная энергия твёрдых тел / В. Д. Кузнецов. — Москва : Гостехиздат, 1954. — 220 с.
7. Трояновский, Е. А. Связь поверхностной энергии металлов с микротвёрдостью / Е. А. Трояновский // Тр. Моск. энергет. ин-та. — 1975. — Вып. 213. — С. 44–49.
8. Кунин, Л. Л. О формулах для вычисления поверхностного натяжения металлов / Л. Л. Кунин // Докл. Акад. наук СССР. — 1952. — Т. 79, № 1. — С. 93–96.
9. Демченко, В. В. О взаимной связи работы выхода электрона с поверхностным натяжением / В. В. Демченко, Н. Е. Хомутов // Тр. Моск. хим.-технол. ин-та им. Д. И. Менделеева. — 1962. — Вып. 39. — С. 115.
10. Семенченко, В. К. Поверхностные явления в металлах и сплавах / В. К. Семенченко. — Москва : Гостехиздат, 1957. — 491 с.
11. Карапетянц, М. Х. Химическая термодинамика / М. Х. Карапетянц. — Москва : Химия, 1975. — 584 с.

12. Костецкий, Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. — Киев : Техніка, 1970. — 396 с.
13. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий [и др.]. — Киев : Техніка, 1976. — 296 с.
14. Костецкий, Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения смазочного действия и изнашивания / Б. И. Костецкий // Трение и износ. — 1980. — Т. 1, № 4. — С. 622–637.
15. Даниелян, А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания / А. М. Даниелян. — Москва : Машгиз, 1954. — 276 с.
16. Даниелян, А. М. Тепловой баланс при резании титанового сплава ВТ-2 / А. М. Даниелян // Вестн. машиностроения. — 1957. — № 1. — С. 15–18.
17. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов / А. М. Даниелян [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1968. — 308 с.
18. Тепловые явления и обрабатываемость резанием авиационных материалов / А. И. Белоусов [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1966. — 180 с.
19. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — Москва : Высш. шк., 1985. — 304 с.
20. Васин, С. А. Резание материалов / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. — Москва : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Баумана, 2001. — 447 с.
21. Ящерицын, П. И. Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. — Минск : Новое изд., 2007. — 512 с.
22. Чичинадзе, А. В. Расчёт и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. — Москва : Наука, 1967. — 231 с.
23. Способ определения оптимальной скорости резания : а. с. 983512 СССР / А. А. Рыжкин [и др.]. — Заявл. 06.04.81 ; опубл. 23.12.82, Бюл. № 47. — 5 с.
24. Термодинамический подход к расчёту интенсивности окислительного изнашивания твёрдых сплавов / А. А. Рыжкин [и др.] // Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщ. — 2012. — № 1. — С. 28–38.

Материал поступил в редакцию 07.07.2014.

References

1. Ryzhkin, A. A. Obrabotka materialov rezaniem: fizicheskie osnovy. [Material-cutting technology : physical fundamentals.] Rostov-on-Don : DSTU Publ. Centre, 1995, 242 p. (in Russian).
2. Ryzhkin, A. A. Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumentalnykh rezhushchikh materialov. [Thermophysical processes under wear of tool cutting materials.] Rostov-on-Don : DSTU Publ. Centre, 2005, 311 p. (in Russian).
3. Kuznetsov, V. D. Fizika tverdogo tela. [Solid State Physics.] Tomsk : Poligrafizdat, 1947, vol. 4, 542 p. (in Russian).
4. Yepifanov, G. I., Rebinder, P. A. Ob energeticheskom balanse protcessa rezaniia metallov. [On energy balance of the metal cutting process.] Doklady Akademii nauk SSSR, 1949, vol. 66, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).
5. Khrushchov, M. M., Babichev, M. A. Issledovaniia iznashivaniia metallov. [Studies on metal wear.] Moscow : Izdatelskii tsentr Akademii nauk SSSR, 1960, 351 p. (in Russian).
6. Kuznetsov, V. D. Poverkhnostnaia energiia tverdykh tel. [Surface energy of solids.] Moscow : Gostekhizdat, 1954, 220 p. (in Russian).

7. Troyanovskiy, E. A. Sviaz poverkhnostnoi energii metallov s mikrotverdostiu. [Relationship between the metal surface energy and microhardness.] Trudy MEI, 1975, iss. 213, pp. 44–49 (in Russian).
8. Kunin, L. L. O formulakh dlia vychisleniia poverkhnostnogo natiazheniia metallov. [On formulas for calculating metal surface tension.] Doklady Akademii nauk SSSR, 1952, vol. 79, no. 1, pp. 93–96 (in Russian).
9. Demchenko, V. V., Khomutov, N. E. O vzaimnoi sviazi raboty vykhoda elektrona s poverkhnostnym natiazheniem. [On mutual relation of the electronic work function and surface tension.] Trudy MKhTI im. D. I. Mendeleeva, 1962, iss. 39, p. 115 (in Russian).
10. Semenchenko, V. K. Poverkhnostnye iavleniia v metallakh i splavakh. [Surface phenomena in metals and alloys.] Moscow : Gostekhizdat, 1957, 491 p. (in Russian).
11. Karapetyants, M. K. Khimicheskaiia termodinamika. [Chemical Thermodynamics.] Moscow : Khimiia, 1975, 584 p. (in Russian).
12. Kostetskiy, B. I. Trenie, smazka i iznos v mashinakh. [Friction, lubrication, and wear in machines.] Kiev : Tekhnika, 1970, 396 p. (in Russian).
13. Kostetskiy, B. I., et al. Poverkhnostnaia prochnost materialov pri trenii. [Surface strength of materials under friction.] Kiev : Tekhnika, 1976, 296 p. (in Russian).
14. Kostetskiy, B. I. O roli vtorichnykh struktur v formirovanii mekhanizmov treniia smazochnogo deistviia i iznashivaniia. [On role of secondary structures in developing mechanisms of lubricity friction and wear.] Trenie i iznos, 1980, vol. 1, no. 4, pp. 622–637 (in Russian).
15. Daniyelyan, A. M. Teplota i iznos instrumentov v protsesse rezaniia. [Heat and tool wear under cutting.] Moscow: Mashgiz, 1954, 276 p. (in Russian).
16. Daniyelyan, A. M. Teplovoi balans pri rezanii titanovogo splava VT-2. [Heat balance under titanium alloy VT-2 cutting.] Vestnik mashinostroeniia, 1957, no. 1, pp. 15–18 (in Russian).
17. Daniyelyan, A. M., et al. Obrabotka rezaniem zharoprochnykh staley, splavov i tugoplavkikh metallov. [Machining of heat-resistant steels, alloys, and refractory metals.] Moscow: Mashinostroenie, 1968, 308 p. (in Russian).
18. Belousov, A. I., et al. Teplovyie iavleniia i obrabatyvaemost rezaniem aviatcionnykh materialov. [Thermal phenomena and machinability of aviation materials.] Moscow : Mashinostroenie, 1966, 180 p. (in Russian).
19. Granovskiy, G. I., Granovskiy, V. G. Rezanie metallov. [Metal cutting.] Moscow : Vysshaia shkola, 1985, 304 p. (in Russian).
20. Vasin, S. A., Vereshchaka, A. S., Kushner, V. S. Rezanie materialov. [Material cutting.] Moscow : Izdatelstvo MGTU im. Baumana, 2001, 447 p. (in Russian).
21. Yashcheritsyn, P. I., Feldstein, E. E., Korniyevich, M. A. Teoriia rezaniia. [Cutting theory.] Minsk : Novoe izdanie, 2007, 512 p. (in Russian).
22. Chichinadze, A. V. Raschet i issledovanie vneshnego treniia pri tormozhenii. [Calculation and study of friction under braking.] Moscow : Nauka, 1967, 231 p. (in Russian).
23. Ryzhkin, A. A., et al. Sposob opredeleniia optimalnoi skorosti rezaniia: a.s. 983512 SSSR. [Method for determining the optimum cutting speed: invention certificate 983512 USSR.] Bull. no. 47, 1982, 5 p. (in Russian).
24. Ryzhkin, A. A., et al. Termodinamicheskii podkhod k raschetu intensivnosti okislitel'nogo iznashivaniia tverdykh splavov. [Thermodynamic approach to calculating oxidative wear intensity of hard alloys.] Vestnik RGUPS, 2012, no. 1, pp. 28–38 (in Russian).

ON ESTIMATION OF ENERGY QUANTITY SPENT ON WEAR UNDER CUTTING CONDITIONS*

A. A. Ryzhkin, K. G. Shuchev, D. V. Moiseyev, F. A. Vistoropskaya

Primary channels of the energy dissipation under friction and material cutting are considered. On the basis of the known testing data, it is shown that not all the energy released in these processes is spent on the wear process with the formation of wear particles. A new approach is used to calculate friction and wear characteristics. Proposed dependences differ from the known ones in that they to the fuller extent take into account the quantity of the friction energy "responsible" for the deterioration. The known approaches to assess the energy balance under friction and cutting are analyzed. The relationship between the surface energy and absorbed energy of materials is shown through comparing energy (thermal) costs in macrovolumes and on the actual contact spots. A quantity of energy "responsible" for wear is estimated in the first approximation.

Keywords: *friction energy balance, absorbed energy, wear-out rate, friction energy coefficient, "responsible" for wear.*

* The research is done with the financial support from RFFI. Grant project 12-08-01328/13.