

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.91

В. В. ПОСТНОВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИНХРОНИЗМА  
МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Рассмотрены результаты теоретического и экспериментального исследования взаимосвязи и взаимовлияния механических и тепловых явлений при нестационарном резании труднообрабатываемых материалов, предложены методы оптимизации и лезвийной обработки по термодинамическим условиям изнашивания режущего инструмента. *Нестационарность резания; диссипация; энтропия; износ инструмента*

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для управления лезвийной обработкой деталей и поиска путей повышения работоспособности режущего инструмента используются методы неравновесной термодинамики как теории самоорганизации систем, далеких от термодинамического равновесия.

Несмотря на значительную общность термодинамического подхода к оценке трения, разрушения и изнашивания полученные отечественными и зарубежными учеными зависимости не учитывают особенностей протекания термомеханических процессов при высокоскоростной деформации в зоне резания. Как правило, функциональные связи между входными и выходными параметрами процесса резания получены при условии априорно полного превращения механической энергии в тепловую в пределах зоны контакта инструмента с заготовкой. Расчетные зависимости содержат ряд параметров, которые не могут быть определены экспериментально или расчетным путем.

В связи с вышеизложенным актуальной представляется разработка термодинамических принципов обеспечения синхронизма механических и тепловых явлений, определения термодинамических условий, критериев и методов минимизации интенсивности изнашивания режущих инструментов. При этом предполагается возможность неполного превращения механической энергии в тепловую в пределах зоны контакта и возможность увеличения напряже-

ния сдвига внутри пластической зоны контакта инструмента с деталью.

1. УРАВНЕНИЕ ОБЩЕГО  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Принимая в первом приближении, что механическая внешняя энергия  $\bar{\Psi}_p$ , подведенная к зоне контакта инструмента с деталью, затрачивается на тепловыделение при деформации обрабатываемого материала  $\bar{\Psi}_d$ , а также на изменение внутренней энергии при формоизменении и износе инструментального материала  $\bar{\Psi}_F$ , закон сохранения энергии в форме баланса диссипативных функций можно записать в виде [1]

$$\bar{\Psi}_p = \bar{\Psi}_d + \bar{\Psi}_F. \quad (1)$$

Используя закономерности теории резания, кинетической теории прочности и пластичности, механохимии и физической кинетики, конкретизируя составляющие уравнения баланса, можно реализовать принципиальную возможность управления изнашиванием инструмента путем целенаправленного изменения механической  $\bar{\Psi}_p$  и тепловой  $\bar{\Psi}_d$  составляющих уравнения энергетического баланса, в том числе за счет выбора не только оптимальных сочетаний управляемых параметров процесса резания, но и скоростей их изменения.

С учетом указанных выше условий, ограничений и принятых моделей получено уравнение общего энергетического баланса [1]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{b(h_3 + c_1)} (l \frac{dP_z}{d\tau} + P_z v) = \\ = \frac{n'}{D} 10^5 \rho c \Delta\theta_m (1-m) h_\theta \varepsilon' + \\ + \frac{1}{A_r} \left[ \frac{3(1+\mu)\sigma_{-\eta}^2}{4E} \right] \frac{dV_d}{d\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $b$  — ширина срезаемого слоя;  $h_3$  и  $c_1$  — длины контакта резца со стружкой и деталью по задней и передней поверхностям инструмента;  $l$  — путь резания;  $\tau$  — время резания;  $P_z$  — сила резания;  $\rho$  и  $c$  — плотность и удельная теплоемкость материала детали;  $m$  — коэффициент температурно-скоростного упрочнения материала детали в контактной зоне;  $\Delta\theta_m$  — температура, модифицированная на скорости деформации  $\varepsilon'$ ;  $h_\theta$  — толщина термопластически деформированного слоя материала детали;  $V_d$  — деформированный объем;  $\mu$  и  $E$  — коэффициент Пуассона и модуль упругости инструментального материала;  $\sigma_{-\eta}$  — напряжение, обеспечивающее локальные сдвиги в объеме деформируемого слоя материала инструмента.

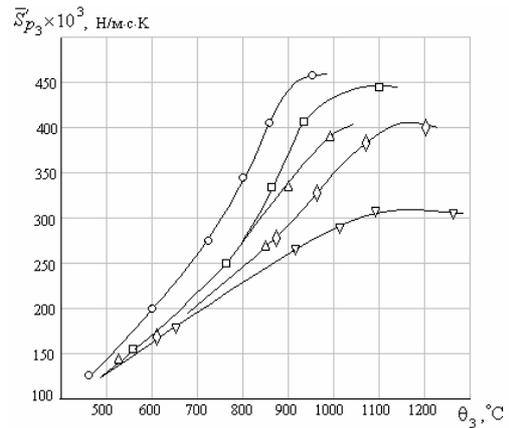
Таким образом, получена термодинамическая модель контактных процессов в зоне резания, позволяющая рассчитать удельные потоки и определить степень полноты превращения механической энергии в тепловую.

## 2. УСЛОВИЯ СИНХРОНИЗМА МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

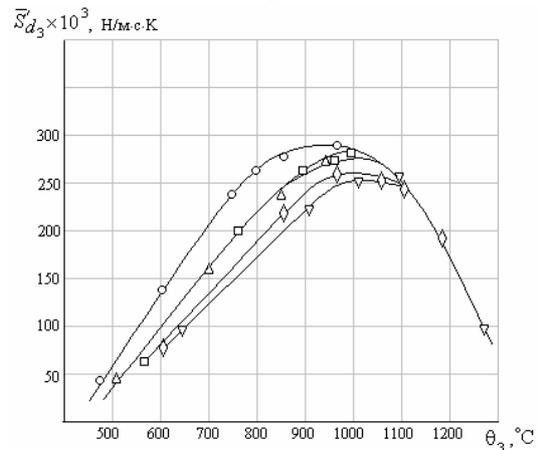
Необратимость диссипативных процессов обеспечивается соответствующими потоками энтропии [2]. На рис. 1 представлены температурные зависимости производства энтропии  $\bar{S}'_{p_3} = \bar{\Psi}_{p_3}/\theta$  от действия внешних сил и скорости ее изменения, обусловленной тепловыми процессами  $\bar{S}'_{p_3} = \bar{\Psi}_{p_3}/\theta$  при различных фасках износа  $h_3$  и скоростях резания.

Полученные данные показывают, что с увеличением скорости резания (температуры задней поверхности  $\theta_3$ )  $\bar{S}'_{p_3}$  и  $\bar{S}'_{d_3}$  возрастают. При этом рост фаски износа вызывает снижение уровня зависимости  $\bar{S}'_{p_3}(\theta_3)$  тем большее, чем выше температура контакта. Для зависимости  $\bar{S}'_{d_3}(\theta_3)$  аналогичное поведение наблюдается только до температур порядка 1220 К. В зоне высоких температур  $\bar{S}'_{d_3}$  снижается, при этом зависимость для различных  $h_3$  сливается в

единую кривую. Это позволяет сделать вывод о том, что при температурах контакта, превышающих некоторую критическую  $\theta_{кр}$ , эффективность диссипации энергии в виде тепла за счет роста площади контакта при увеличении фаски износа резко снижается. Следует отметить, что температура 1223 К близка к так называемой температуре красной точки для твердого сплава ВК8, используемого в данном случае в качестве инструментального материала.



а



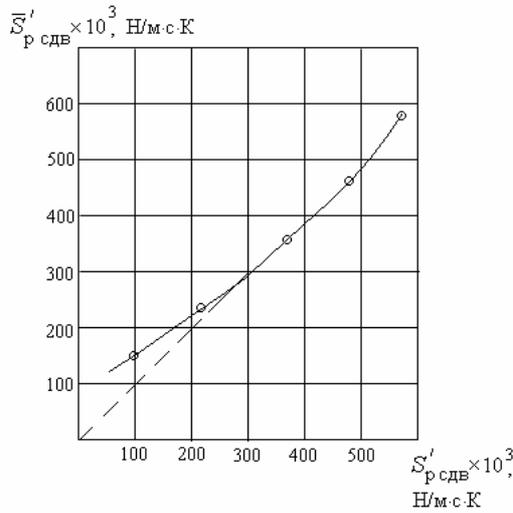
б

**Рис. 1.** Зависимость производства энтропии  $\bar{S}'_{p_3}$  (а) и  $\bar{S}'_{d_3}$  (б) от средней температуры задней поверхности (ХН73МБТЮ – ВК8):

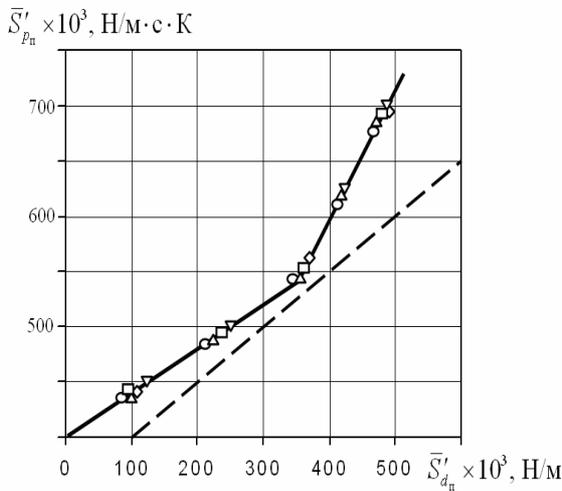
○ –  $h_3 = 0$  мм; Δ –  $h_3 = 0,2$  мм; □ –  $h_3 = 0,35$  мм;  
◇ –  $h_3 = 0,5$  мм; ▽ –  $h_3 = 0,6$  мм

Графическим представлением уравнения баланса диссипативных функций в форме скоростей изменения энтропии являются зависимости  $\bar{S}'_p = f(\bar{S}'_d)$ , которые построены для зоны стружкообразования (рис. 3) передней поверхности, зон контакта инструмента со стружкой, задней поверхности (фаски износа) с деталью (рис. 5) и суммарной, для полной зоны контакта инструмента с заготовкой (рис. 6) на

основании температурных зависимостей  $\bar{S}'_{p_i}$  и  $\bar{S}'_{d_i}$  (рис. 1) для различных сочетаний скоростей резания и высоты  $h_3$  фаски задней поверхности инструмента.



**Рис. 2.** Зависимость между механической  $S'_p$  и тепловой  $S'_d$  составляющими скорости производства энтропии для зоны сдвига (ХН73МБТЮ-ВК8).  
Условные обозначения аналогичны рис. 1



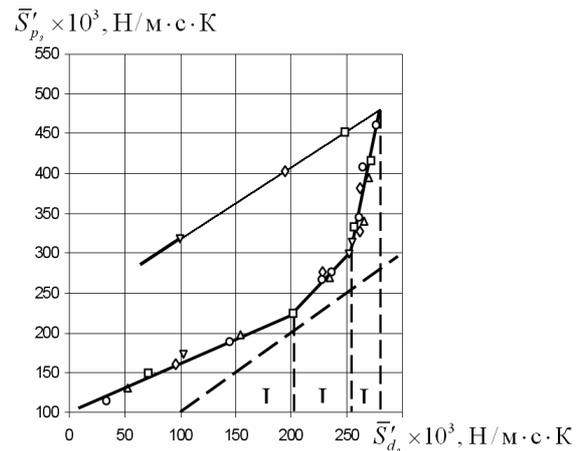
**Рис. 3.** Зависимость между механической  $S'_p$  и тепловой  $S'_d$  составляющими скорости производства энтропии для передней поверхности инструмента (ХН73МБТЮ-ВК8).  
Условные обозначения аналогичны рис. 1

Зависимости  $\bar{S}'_p(\bar{S}'_d)$  с достаточной точностью могут быть аппроксимированы отрезками прямых. На расчетно-экспериментальные зависимости пунктиром нанесены линии полной трансформации механической энергии в тепло-

вую при условии  $\bar{S}'_p = \bar{S}'_d$ . Изменение энтропии  $dS_p$  системы трения при резании может быть представлено суммой [2]

$$dS_p = d_e S + d_i S, \quad (3)$$

где  $d_e S$  – изменение энтропии за счет обмена теплом и количеством вещества с окружающей средой ( $d_e S = S'_d \cdot dt$ );  $d_i S$  – изменение энтропии за счет процессов внутри системы.



**Рис. 4.** Зависимость между механической  $S'_p$  и тепловой  $S'_d$  составляющими скорости производства энтропии для задней поверхности инструмента (ХН73МБТЮ-ВК8).  
Условные обозначения аналогичны рис. 1

Представленные на рис. 2–5 данные показывают, что скорость производства энтропии  $\bar{S}'_p$  для всех зон деформации больше скорости ее отвода в виде тепла  $\bar{S}'_d$ , поскольку зависимости  $\bar{S}'_p(\bar{S}'_d)$  лежат выше пунктирной линии. Наиболее полная диссипация энергии происходит в зоне сдвига. В диапазоне высоких скоростей (температур) контакта  $\bar{S}'_p = \bar{S}'_d$ , т. е. по выражению (рис. 3)  $d_i S \rightarrow 0$ .

Наибольшие значения изменения внутренней энтропии  $d_i S$  наблюдаются для зоны контакта задней поверхности инструмента (рис. 4) вследствие затрат внешней энергии как на деформационное упрочнение обработанной поверхности, так и на изнашивание режущего инструмента.

Общей для полученных зависимостей является тенденция стремления к максимально полной трансформации ( $\bar{S}'_p = \bar{S}'_d$ ) механической энергии в тепловую при определенных критических значениях  $\bar{S}'_p$  и  $\bar{S}'_d$ .

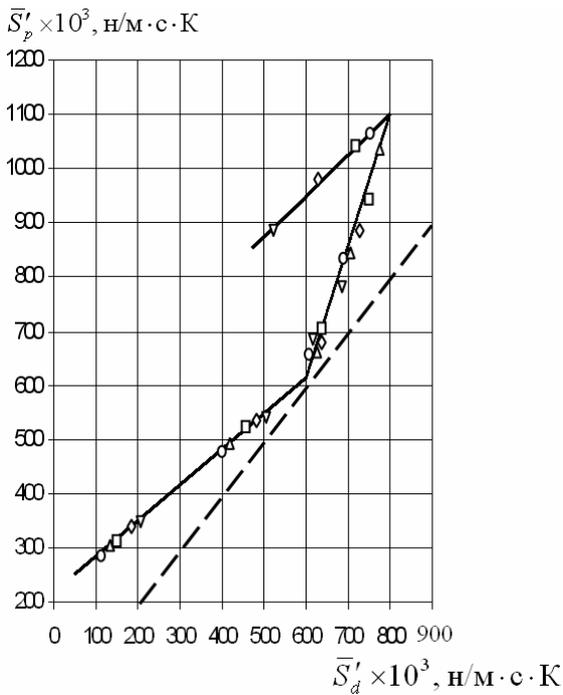


Рис. 5. Зависимость между механической  $S'_p$

и тепловой  $S'_d$  составляющими скорости производства энтропии для суммарной зоны резания (ХН73МБТЮ-ВК8).

Условные обозначения аналогичны рис. 1

С увеличением  $\bar{S}'$  свыше этих значений приращение тепловой составляющей  $\bar{S}'_d$  скорости изменения энтропии начинает отставать от производства механической энергии  $\bar{S}'_p$  в зоне контакта инструмента с деталью. С позиций синергетики эти критические значения  $\bar{S}'$  являются точками бифуркации, при которых происходит изменение механизма диссипации энергии. Точки бифуркации соответствуют переломам зависимостей  $\bar{S}'_p(\bar{S}'_d)$ .

Для зон стружкообразования (рис. 2) и контакта стружки с передней поверхностью (рис. 3) обнаружено по одной точке бифуркации; для суммарной зависимости (рис. 5) их две, а для зоны контакта задней поверхности инструмента с деталью (рис. 4) можно выделить три точки бифуркации.

Полученная зависимость  $\bar{S}'_{p_3}(\bar{S}'_{d_3})$  позволяет сделать заключение о существовании энергетически оптимальной зоны эксплуатации режущего инструмента (зона II на рис. 5), в пределах которой наблюдаются наиболее полная диссипация механической энергии в тепловую и отвод ее из зоны контакта термопластическим деформированным приконтактным слоем  $h_{\theta_3}$  обработанной поверхности детали. Указанная

зона ограничена с одной стороны оптимальной температурой резания  $\theta_0$  [3]. Верхняя температурная граница, по-видимому, соответствует температуре потери формоустойчивости задней поверхности инструмента и связана с началом интенсивного диффузионного износа режущего инструмента.

## ВЫВОДЫ

1. Впервые на основе количественного анализа скоростей производства энтропии и ее отвода из зоны контакта термопластически деформированными слоями обрабатываемого материала установлено существование оптимальных температурно-ресурсных зон эксплуатации режущих инструментов, в пределах которых наблюдается максимально полная трансформация и диссипация механической энергии из зоны контакта инструмента с деталью, чем обеспечивается снижение термодинамической нагруженности приконтактных слоев инструмента. Обеспечение и управление таким состоянием изнашиваемых поверхностей инструмента достигается за счет выбора диапазона элементов режима резания и определенной оптимальной скорости их изменения в процессе резания.

2. Установлено, что нижняя температурная граница (оптимальная температура резания) инвариантна к изменению режима обработки и является физической константой для сочетания материалов детали и резца, а величина верхней температурной границы, связанная с потерей формоустойчивости режущей кромки инструмента, снижается при возрастании общего уровня механической нагруженности зоны резания

3. На основе анализа влияния элементов режима резания на удельные затраты механической энергии (диссипативную функцию сил резания) установлено, что наибольший вклад в суммарную энергетическую нагруженность зоны резания вносит зона сдвига, затем следует зона трения по задней поверхности инструмента, наименьшие затраты обеспечивает контакт стружки с передней поверхностью инструмента.

4. С увеличением скорости резания диссипативная функция  $\bar{\Psi}_{p_3}$  силы трения по задней поверхности инструмента возрастает, при этом рост фаски износа инструмента приводит к увеличению интенсивности скоростной зависимости указанной диссипативной функции в пределах зоны установившегося (нормального) износа. В зоне катастрофического износа с увеличением скорости резания в диапазоне скоростей, больше оптимальных по износостойкости

режущего инструмента, наблюдается снижение диссипативной функции  $\bar{\Psi}_{p_3}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Постнов, В. В.** Термодинамические принципы обеспечения управляемости процесса резания / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. Уфа, 2005. № 6(12). С. 98–106.
2. **Иванова, В. С.** Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов / В. С. Иванова. М. : Наука, 1992. 160 с.
3. **Макаров, А. Д.** Износ и стойкость режущего инструмента / А. Д. Макаров. М. : Машиностроение, 1966. 264 с.

### ОБ АВТОРЕ



**Постнов Владимир Валентинович**, проф. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по техн. и оборуд. мех. и физ. тех. обработки (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. нестац. процессов резания жаропрочн. сталей и сплавов.