

И. Г. Каримов

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ

Рассмотрено влияние температуры резания на энергетические параметры контактного взаимодействия инструмента с деталью, определены границы температурной зоны эксплуатации режущего инструмента, в пределах которой наблюдается наиболее полная диссипация механической энергии в тепловую, и обеспечивается максимальная размерная стойкость инструмента рассматривается траектория движения фиксированной точки, расположенной на оси вращения инструмента. *Резание; диссипация энергии; энтропия; стойкость инструмента*

ВВЕДЕНИЕ

Металлообработка продолжает оставаться одним из основных процессов формообразования точных поверхностей ответственных деталей, поэтому совершенствование технологических операций лезвийной обработки является важным резервом повышения эффективности производства.

Учитывая значительное влияние тепловых явлений на процессы трения и изнашивания инструмента, теплофизические свойства обрабатываемого и инструментального материалов в работах [3, 4], сделано заключение о том, что температура резания является основным параметром, определяющим эффективность процесса механообработки.

Скорость v резания, подача S инструмента и глубина резания t влияют не только на интенсивность теплообразования, но и на интенсивность стока тепла, поскольку произведение $V \cdot s \cdot t$ выражает отвод объема нагретой стружки в единицу времени. Температура резания, таким образом, выступает не только в роли отрицательного фактора (термическое разупрочнение инструментального материала), но и как положительный фактор, указывающий на увеличение теплосодержания ΔH , улучшение отвода тепловой энергии из зоны обработки, снижение скорости образования энтропии в системе контакта инструмента с деталью. Катастрофического износа и разрушения контактных поверхностей инструмента не будет происходить, пока система «инструмент – деталь» способна освободить себя от той энтропии, которую она вынуждена производить в процессе диссипации подводимой к ней механической энергии.

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В настоящее время не существует точных аналитических выражений, которые описывали бы процессы диссипации энергии в зоне контакта инструмента с деталью. В первом приближении изменение внутренней энергии термодинамической системы «резец–деталь» можно представить как энергию, затраченную на формоизменение (изнашивание) инструментального материала, а первый закон термодинамики (закон сохранения количества энергии) для процессов трения и изнашивания при резании записать в дифференциальной форме как уравнение баланса диссипативных функций, предоставляющих собой скорость изменения энергии контактного процесса, отнесенную к единице площади контакта [4].

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

где $\bar{\Psi}_p$ – диссипативная функция внешних сил (сил резания); $\bar{\Psi}_d$ – диссипативная функция процесса тепловыделения при пластической деформации обрабатываемого материала; $\bar{\Psi}_F$ – диссипативная функция формоизменения контактных поверхностей инструментального материала; которые с учетом данных [4] для основных диссипативных функций процесса контактного взаимодействия при нестационарном резании, можно представить как уравнение скорости изменения общего энергетического баланса:

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

где b – ширина срезаемого слоя; h_3 – длины контакта резца со стружкой и деталью по задней поверхностям инструмента; l – путь резания; τ – время резания; ρ и c – плотность и удельная теплоемкость материала детали; $\Delta\theta$ – температура, модифицированная но скорости деформации ε' ; h_θ – толщина термопластически деформированного слоя материала детали; V_d – деформированный объем; μ и E – коэффициент Пуассона и модуль упругости инструментального материала; $\sigma_{-\eta}$ – напряжение, обеспечивающее локальные сдвиги в объеме деформируемого слоя материала инструмента.

Для чистовой и получистовой обработки жаро- и особо прочных материалов, когда стойкость инструмента определяется износом его задней поверхности, для расчета баланса механической и тепловой энергий целесообразно использовать его составляющие для зоны вторичной пластической деформации по задней поверхности инструмента [4]

$$\bar{\Psi}_{P_3} = \bar{\Psi}_{d_3} + \bar{\Psi}_{F_3}, \quad (3)$$

или

$$\begin{aligned} & \frac{1}{bh_3} \cdot \frac{d}{d\tau} (q'_F \cdot l \cdot bh_3) = \\ & = \frac{n'}{D} \cdot 10^5 \rho c \cdot \Delta\theta \cdot m_p (1-m) h_{\theta_3} \cdot \varepsilon'_3 + \quad (4) \\ & + \frac{1}{bh_3} \left[\frac{3(1+\mu) \cdot \sigma_{-\eta}^2}{4E} + \sigma_m \right] \cdot \frac{dV_d}{d\tau}, \end{aligned}$$

откуда скорость изменения деформируемого объема приконтактного слоя инструмента

$$\begin{aligned} \frac{dV_d}{d\tau} = & \frac{4E}{3(1+\mu)\sigma^2 \cdot \eta + 4E \cdot \sigma_m} \left[\frac{n'}{D} \cdot 10^5 \rho c \cdot \Delta\theta \times \right. \\ & \left. \times m_p (1-m) h_{\theta_3} \cdot \varepsilon'_3 \cdot bh_3 - \frac{d}{d\tau} (q'_F \cdot bh_3 \cdot l) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

Таким образом, выражения (3, 4, 5) в дифференциальной форме связывают скорость изменения деформируемого и изнашиваемого объема приконтактной зоны режущего инструмента с затратами механической энергии, под-

веденной к фрикционному контакту, текущими значениями температуры и действующих напряжений, скоростью деформации в приконтактных слоях обрабатываемого материала.

Изменение режима резания, непрерывное или ступенчатое, как показано в работе [2] неоднозначно влияет на P_z и θ , а следовательно – на механическую $\bar{\Psi}_p$ и тепловую $\bar{\Psi}_d$ составляющие уравнения энергетического баланса, изменяя их соотношение и долю энергии $\bar{\Psi}_F$, затрачиваемой на изнашивание режущего инструмента.

Таким образом, появляется возможность управления интенсивностью износа инструмента путем целенаправленного изменения механической и тепловой составляющих уравнения энергетического баланса. Для реализации этого необходимо изучить температурные зависимости составляющих энергетического баланса при резании, определить пути управления этими параметрами, их оптимальные значения, закономерности влияния на характеристики износоустойчивости инструмента.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ

На основании экспериментальных данных проведены расчеты составляющих баланса диссипативных функций (4) для различных скоростей (температур) резания и высот h_3 фаски износа инструмента.

Основные термодинамические параметры зоны сдвига представлены на рис. 1. Увеличение скорости резания приводит к возрастанию механической и тепловой нагруженности зоны сдвига, стабилизации максимальной температуры θ_d и напряжений τ_p в зоне сдвига при скоростях выше оптимальных по критерию интенсивности износа инструмента.

Анализ температурных зависимостей относительной доли удельной энергии, уходящей в стружку, деталь, резец показывает (рис. 2), что для различных сочетаний скорости резания и фаски износа h_3 инструмента наблюдаются их экстремумы в определенном диапазоне температур резания.

Если трактовать полученные данные с позиций синергетики, как явление самоорганизации процесса резания путем оптимальной приспособляемости изнашиваемой части инструмента к величине и распределению разрушающих факторов – механической и тепловой нагрузки,

можно сделать следующее заключение о том, что существует энергетически оптимальный диапазон скоростей (температур) резания, в пределах которого $\bar{\Psi}_{d_3} \rightarrow \bar{\Psi}_{p_3}$ и реализуется наиболее полная диссипация подводимой энергии в виде теплового потока, уходящего из зоны контакта фаски износа инструмента с обработанной поверхностью детали. С увеличением фаски износа эффективность указанного канала диссипации энергии снижается в наименьшей степени для диапазона оптимальных, и в наибольшей – для высоких скоростей резания.

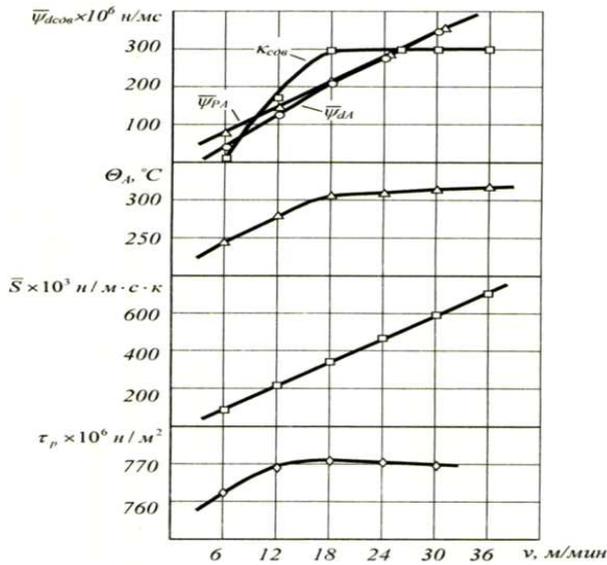


Рис. 1. Влияние скорости резания на термодинамические параметры зоны сдвига при тчении сплава ХН 73МБТ10 резцом ВК 8 ($s = 0,11$ мм/об, $t = 0,5$ мм)

Рассмотрим влияние скорости (температуры) резания на диссипативную функцию $\bar{\Psi}_p$ силы резания и энтропию \bar{S}_p , определяющие интенсивность механической нагруженности зоны резания, поскольку необратимость диссипативных процессов обеспечивается соответствующими потоками энтропии.

В связи с этим произведены расчеты скоростей изменения энтропии $\bar{S} = \frac{1}{\theta} \cdot \bar{\Psi}_p$ для приведенных на рис. 2 зависимостей $\psi_i(V, h_3)$. При этом в качестве обобщенной переменной использовали среднюю температуру задней поверхности. На рис. 3 и 4 представлены зависимости производства энтропии \bar{S}_{p_3} от действия внешних сил и скорости ее изменения, обусловленной тепловыми процессами $\bar{S}_{d_3} = 1/\theta \cdot \bar{\Psi}_{d_3}$

при различных фасках износа h_3 и скоростях резания.

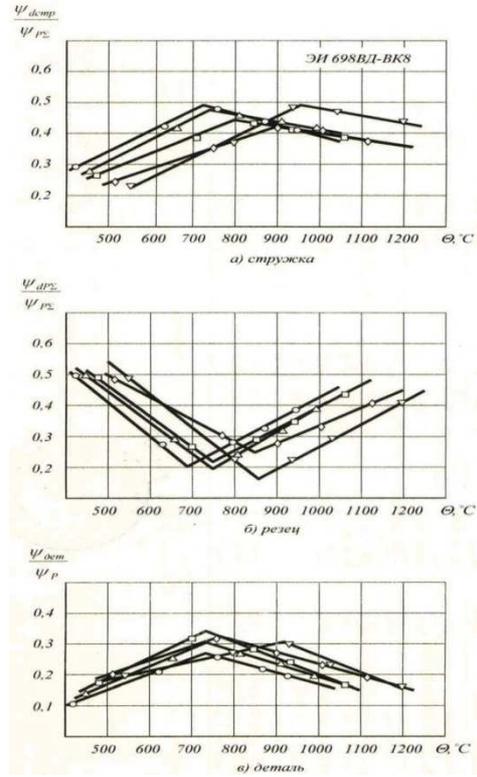


Рис. 2. Относительная доля удельной энергии, уходящая в стружку, деталь, резец, в зависимости от θ резания (ХН 73 МБТЮ-ВК 8) $\circ - h_3 = 0$ мм; $\Delta - h_3 = 0,2$ мм; $\square - h_3 = 0,35$ мм; $\diamond - h_3 = 0,5$ мм; $\nabla - h_3 = 0,6$ мм

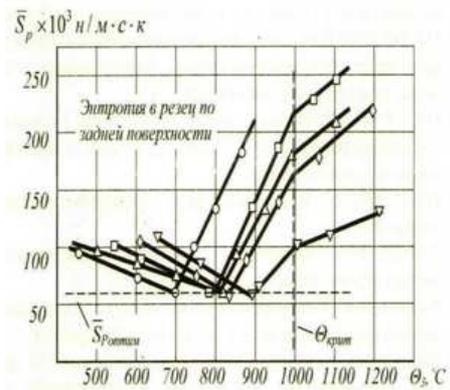


Рис. 3. Влияние температуры резания и износа инструмента на величину механической составляющей скорости производства энтропии в резец со стороны фаски износа. Условные обозначения аналогичны рис. 2

Результаты расчетов, представленные на рис. 4 показывают, что удельные затраты $\bar{\Psi}_{дрз}$ тепловой энергии, выделенной на изнашиваемой поверхности инструмента, с увеличением скорости резания возрастают нелинейно. Интенсивность нарастания энергетической нагрузки увеличивается с ростом фаски износа инструмента в диапазоне малых и средних скоростей резания.

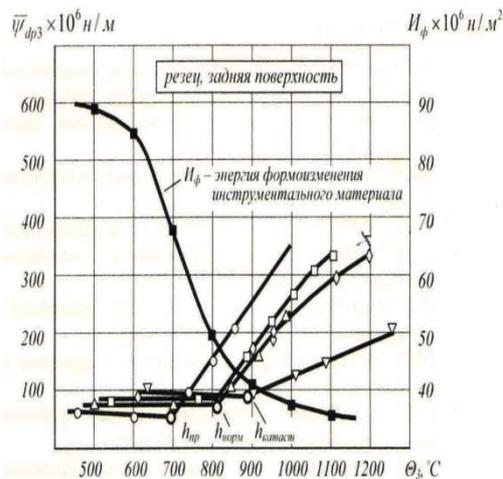


Рис. 4. Влияние температуры резания на удельную тепловую энергию $\bar{\Psi}_{дрз}$,

выделяющуюся на задней поверхности инструмента и энергию U_{ϕ} , затрачиваемую на деформацию инструментального материала при различных фасках износа. (ХН73 МБТЮ-ВК8). Условные обозначения аналогичны рис. 2

При этом энергия, требуемая на изменения контактной поверхности инструмента в результате его износа, рассчитывается по формуле:

$$U_{\phi} = \frac{3(1 + \mu) \cdot \sigma^2 - \eta}{4E}, \quad (6)$$

с увеличением температуры в исследуемом диапазоне достаточно интенсивно снижается.

Зависимости диссипативной функции $\bar{\Psi}_{рз}$ в исследуемом диапазоне скоростей резания для различных значений h_3 и v показаны на рис. 5.

Можно сделать заключение о том, что с увеличением скорости резания $\bar{\Psi}_{рз}$ увеличивается, что вполне объяснимо, поскольку граница зоны деформации, в соответствии с данными [1] является границей симметрии работы деформации, а для зоны сдвига – и потоков тепла.

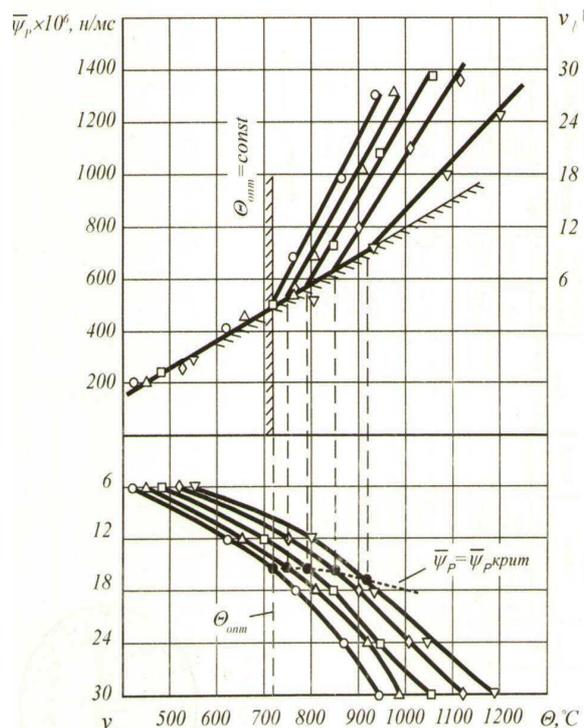


Рис. 5. Влияние температуры и скорости резания на удельную энергию, затрачиваемую на изнашивание инструмента ВК 6М при точении сплава ХН73МБТЮ при различных критериях затупления. Условные обозначения соответствуют рис. 2

Рост фаски износа приводит к увеличению интенсивности $d\bar{\Psi}_{рз}/dV$ скоростной зависимости диссипативной функции, но эта закономерность нарушается для величин $h_3 \geq 0,5$ мм, соответствующих зоне катастрофического износа для данной пары «инструмент – деталь». С точки зрения синергетики это свидетельствует об изменении механизма эволюции системы «резец – деталь» как процесса эффективного использования энергии и вещества внешней среды за счет формирования положительных обратных связей (отвода тепловой энергии) при переходе от установившегося (нормального) процесса износа к катастрофическому. Следует отметить, что изменение монотонности зависимости $\bar{\Psi}_{рз}(V, h_3)$ наблюдается в диапазоне скоростей, больших оптимальных по износостойкости инструмента, при температурах задней поверхности, превышающих температуру красностойкости данного инструментального материала ($\Theta_{кр} \approx 1220$ К для ВК8).

Представив в соответствии с принципом суперпозиции энергии [20] суммарную скорость

производства энтропии S_{Σ} , или сумму соответствующих по трем зонам деформации, рассмотрим влияние средней температуры резания на S_{Σ} (рис. 6).

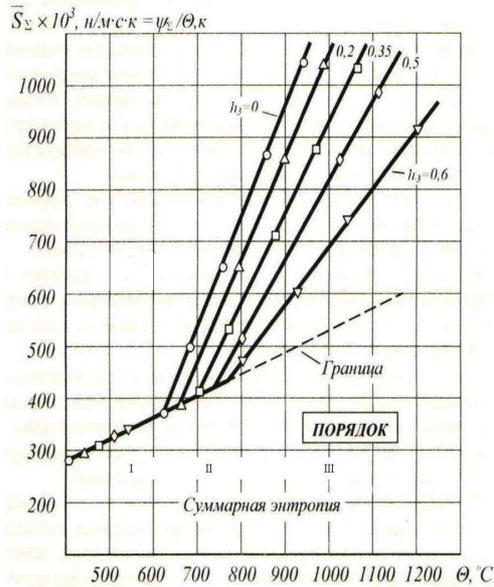


Рис. 6. Влияние температуры резания для различных сочетаний скоростей резания и фаски износа инструмента на суммарную скорость производства энтропии (ХН 73МБТЮ-ВК6М)

ВЫВОДЫ

Полученная зависимость $\bar{S}_{\Sigma}(\theta, h_3)$ позволяет сделать заключение о существовании энергетически оптимальной температурной зоны эксплуатации режущего инструмента (зона II на

рис. 6), в пределах которой наблюдается наиболее полная диссипация механической энергии в тепловую и отвод ее из зоны контакта термомеханическим деформированным приконтактным слоем обработанной поверхности детали. Указанная зона ограничена с одной стороны оптимальной температурой резания. Верхняя температурная граница, по-видимому, соответствует температуре потери формоустойчивости задней поверхности инструмента и связана с началом интенсивного диффузионного износа режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С.** Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. 448 с.
2. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. **Силин С. С.** Определение оптимальных режимов резания на основе изучения теплофизических процессов методами подобия. Теплофизика технологических процессов. Куйбышев: КуАИ, 1970. С. 32–44.
4. **Постнов В. В., Юрьев В. Л.** Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием М.: Машиностроение, 2009.

ОБ АВТОРЕ

Каримов Ильдар Гаянович, соискатель каф. мехатронных станочных систем, зам. ген. дир. ОАО «Институт технологии и организации производства».