

УДК 621.91

В. В. ПОСТНОВ

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЗАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

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

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ конструктивных особенностей и технологических схем обработки деталей сложной конфигурации, применяемых в авиационной, энергетической, космической и других наукоемких отраслях машиностроения, показывает, что подавляющее большинство поверхностей этих деталей (торцевые, конические, тороидальные) обрабатываются при непрерывном и закономерном изменении одного или нескольких элементов режима резания. Как правило, указанные детали изготавливаются из жаро- и особопрочных материалов, обладающих весьма низкой обрабатываемостью вследствие высокой интенсивности износа режущего инструмента.

Износ инструмента приводит к дестабилизации внутренних и выходных параметров процесса резания (силы и температуры характеристик качества обработанной поверхности), на которые накладывается внешняя нестационарность от изменения входных управляемых и неуправляемых параметров обработки, в том числе — обусловленная использованием систем автоматического управления, реализующих направленное изменение элементов режима резания для поддержания температурно-скоростного и силового режимов на оптимальном уровне.

Нестационарный режим определяется в каждый момент времени не только текущими значениями скорости резания  $v$ , подачи  $S$  и глубины  $t$ , но и их производными по времени: ускорением движения резания  $a_v$ , скоростью изменения подачи  $a_S$  и глубины резания  $a_t$ .

В последнее время получены существенные результаты, позволяющие проводить разработку новых методов управления лезвийной обработкой при использовании положений термодинамики неравновесных процессов для комплексного анализа контактных явлений в зоне обработки и износостойкости режущего инструмента с учетом взаимосвязи и взаимовлияния (синхронизма) [1] механохимических и тепловых процессов, протекающих в зоне контакта, трансформации свойств взаимодействующих поверхностей инструмента и детали. Как показали исследования отечественных и зарубежных ученых, синхронизм механической и тепловой энергий в зоне обработки обеспечивает оптимальные характеристики выходных параметров механообработки, вследствие чего представляет наиболее широкие возможности для управления технологическим процессом.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является разработка термодинамических принципов обеспечения управляемости и интенсификации нестационарной лезвийной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов для повышения эффективности эксплуатации мехатронных станочных систем. Нестационарный режим определяется в каждый момент времени не только текущими значениями скорости резания  $v$ , подачи  $S$  и глубины  $t$ , но и их производными по времени: ускорением движения резания  $a_v$ , скоростью изменения подачи  $a_S$  и глубины резания  $a_t$ .

### 1. СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Состояние зоны контакта инструмента с деталью как самоорганизующейся термодинамической системы при переменных во времени  $\tau$  условиях нагружения описано с помощью диссипативных функций  $\bar{\Psi}_i$ , представляющих собой скорость изменения  $du_i/d\tau$  энергии какого-либо процесса, отнесенную к единице фактической площади  $A_r$  контакта или же рассчитываемых как произведение скорости изменения энтропии на температуру, а также как произведение термодинамической (обобщенной) силы  $(\Delta\sigma_i)$  и обобщенного потока  $(J_i)$ :

$$\bar{\Psi}_i = \frac{1}{A_r} \frac{du_i}{d\tau} = \theta \frac{d\bar{s}_i}{d\tau} = (\delta\sigma_i)J_i, \quad (1)$$

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 (ДФ) можно записать в виде [2]

$$\bar{\Psi}_p = \bar{\Psi}_d + \bar{\Psi}_F. \quad (2)$$

На основе закономерностей теории резания, кинетической теории прочности и пластичности, механохимии и физической кинетики были конкретизированы составляющие уравнения баланса ДФ.

При получении уравнения ДФ пластической деформации исходили из представления о трансформации энергии деформации в тепловую энергию, рассеиваемую в стружку, деталь, резец и окружающую среду. При этом предполагалась возможность неполного превращения механической энергии в тепловую в пределах зоны контакта инструмента с деталью («дефект энергии») вследствие высоких скоростей и ускорений деформации, конечности скорости превращения и возможности увеличения напряжения сдвига  $\tau_p$  внутри пластической зоны вследствие эффекта скоростного упрочнения, компенсирующего разупрочняющее влияние температуры.

Для оценки энергии формоизменения инструментального материала при его изнашивании и образовании новых свободных поверхностей использована модель сложно-напряженного состояния граничного слоя ко-

нечной толщины  $h_o$  для случая произвольного распределения внешних удельных нагрузок. Для определения внутренних разрушающих напряжений решена контактная задача теории пластичности для сложно-напряженного состояния фрагмента износа с учетом статистического подхода к определению усталостной прочности инструментального материала при нестационарном тепловом режиме нагружения.

С учетом указанных выше условий, ограничений и принятых моделей конкретизированы выражения  $\bar{\Psi}_p$ ,  $\bar{\Psi}_d$ ,  $\bar{\Psi}_F$  и получено уравнение общего энергетического баланса

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

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;  $P_z$  — 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 по 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 модель термодинамического описания контактных процессов в зоне резания, позволяющая рассчитать скорость объемного износа инструмента по известной взаимосвязи между деформированным и изношенным объемами  $V_d = V_h N$ , определив число воздействий  $N$ , приводящих к образованию и отделению частицы износа.

Уравнение (3) показывает принципиальную возможность управления интенсивностью износа инструмента путем целенаправленного изменения механической и тепловой составляющих уравнения энергетического баланса, в том числе — за счет выбора не только оптимальных сочетаний  $v$ ,  $s$ ,  $t$ , но и скоростей их изменения. Для реализации этого необходимо учесть деформацион-

ные, силовые и температурные зависимости при нестационарном резании [3], определить пути управления этими параметрами, их оптимальные значения, закономерности влияния на характеристики размерной стойкости инструмента.

## 2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА ДИССИПАТИВНЫХ ФУНКЦИЙ

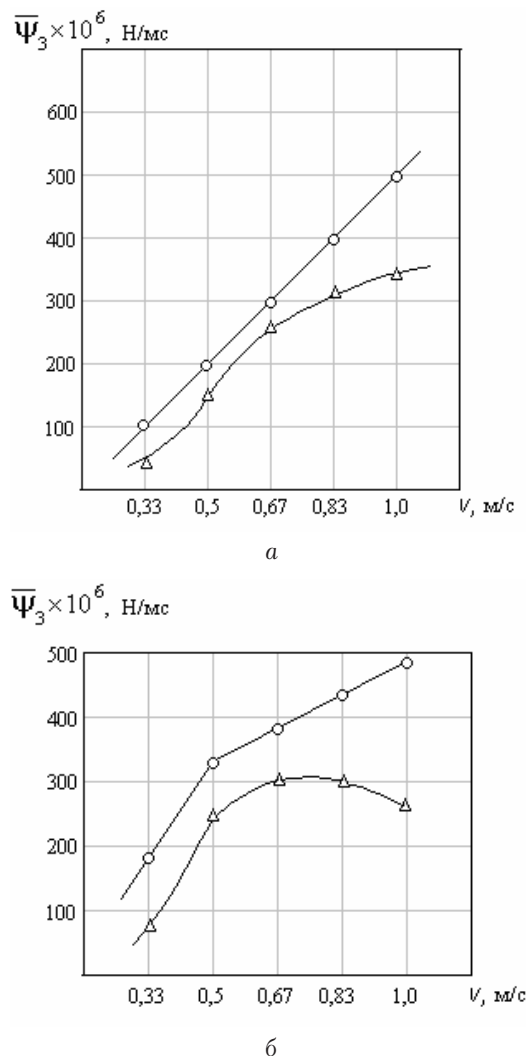
В соответствии с системным подходом к процессу резания как объекту управления рассмотрены отдельно факторы внутренней нестационарности вследствие необратимого роста износа инструмента, внешней нестационарности при функционально изменяемых режимах обработки и их совокупное влияние.

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 и наименьшие затраты обеспечивает контакт стружки с передней поверхностью инструмента.

При точении с переменной скоростью резания интенсивность нарастания механической нагруженности зоны резания ( $\bar{\psi}_p$ ) зависит от величины и знака ускорения  $a_v$  резания. Впервые установлено, что существует некое оптимальное значение положительного ускорения резания, обеспечивающее наименьший уровень затрат удельной механической энергии в диапазоне рациональных скоростей резания. Обработка с отрицательным ускорением не оказывает существенного влияния на уровень энергетической нагруженности зоны резания по сравнению со стационарным режимом.

При точении с переменной подачей инструмента механическая нагруженность зоны резания изменяется немонотонно; установлен эффект стабилизации  $\bar{\psi}_p$  при достижении определенного критического значения подачи, связанного с опережающим влиянием интенсивности нарастания износа инструмента по сравнению с увеличением длины пятна контакта стружки с передней поверхностью реза.

Рассмотрено влияние скорости резания и фаски износа инструмента на ДФ механической и тепловой энергий на задней поверхности инструмента (рис. 1).



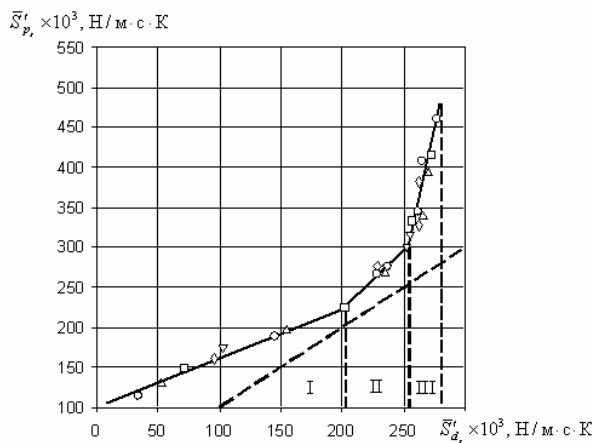
**Рис. 1.** Влияние скорости резания на диссипативные функции механической  $\bar{\psi}_{p3}$  (°) и рассеиваемой тепловой  $\bar{\psi}_{d3}$  (Δ) энергий при различных фасках износа инструмента (ХН73МБТЮ-ВК8): а –  $h_3 = 0,2$  мм; б –  $h_3 = 0,6$  мм

Удельные затраты механической энергии с увеличением скорости резания и фаски износа инструмента возрастают, но при переходе износа в зону катастрофического ( $h_3 = 0,6$  мм) интенсивность нарастания  $\bar{\psi}_{p3}(v)$  падает.

ДФ рассеиваемой тепловой энергии имеет более сложную скоростную зависимость, основной тенденцией которой является сближение  $\bar{\psi}_{p3}$  и  $\bar{\psi}_{d3}$  в диапазоне средних скоростей (температур) резания и значительное отклонение при высоких скоростях, тем большее, чем выше износ инструмента.

Необратимость диссипативных процессов обеспечивается соответствующими потоками энтропии. В связи с этим произведены расчеты скорости производства энтропии  $\dot{S}'_{p3} = 1/\theta \bar{\psi}_{p3}$  от действия внешних сил и скорости ее изменения, обусловленной тепловыми про-

цессами  $\bar{S}'_{d_3} = 1/\theta\bar{\psi}_{d_3}$  при различных фасках износа  $h_3$  и скоростях резания. Графическим представлением уравнения баланса диссипативных функций в форме скоростей изменения энтропии являются зависимости  $\bar{S}'_p = f(\bar{S}'_d)$ , на которые пунктиром нанесены линии полной трансформации механической энергии в тепловую при условии  $\bar{S}'_p = \bar{S}'_d$ . 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  $\bar{S}'_d$ . Наиболее значимой и сложной является зависимость  $\bar{S}'_p(\bar{S}'_d)$  для задней поверхности инструмента, представленная на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость между механической  $\bar{S}'_p$  и тепловой  $\bar{S}'_d$  составляющими скорости производства энтропии для задней поверхности инструмента (ХН73МБТЮ-ВК8)

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. 2), в пределах которой наблюдается наиболее полная диссипация механической энергии в тепловую и отвод ее из зоны контакта термомпластическим деформированным приконтактным слоем  $h_{\theta_3}$  обработанной поверхности детали. Указанная зона ограничена снизу оптимальной температурой резания  $\theta_o$ . Верхняя температурная граница, по-видимому, соответствует температуре потери формоустойчивости задней поверхности инструмента и может быть связана с началом интенсивного диффузионного износа режущего инструмента.

Минимизация интенсивности износа обеспечивается в оптимальном диапазоне температур контакта за счет максимальной транс-

формации подводимой к зоне контакта механической энергии в тепловую вследствие совокупного влияния предельной локализации энергии в приконтактных слоях обрабатываемого материала при эндотермических структурно-фазовых превращениях и максимально быстрого ее отвода от контактных поверхностей инструмента за счет увеличения сплошности и снижения до минимального значения толщины термомпластически деформированного слоя обрабатываемого материала.

Таким образом, на основе анализа синхронизма механических и тепловых явлений обосновано 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 может быть достигнуто за счет выбора диапазона элементов режима резания и определенной оптимальной скорости их изменения в процессе резания.

### 3. МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЗАНИЯ ПО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ МИНИМИЗАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА

В результате стойкостных экспериментов установлено, что зависимость интенсивности износа инструмента  $h_{ол}$  от скорости резания для нестационарного течения имеет экстремальный характер. Причем для нестационарного течения минимум  $h_{ол}$  наблюдается при скоростях резания, несколько больших, чем для стационарного течения. Это в работе [3] объясняется запаздыванием процесса тепловыделения при пластической деформации, снижением силы резания и изменением условий формоустойчивости режущего клина.

Зависимость интенсивности износа инструмента от температуры резания имеет минимум при температуре  $\theta_{опт}$ , которая не зависит от знака и величины ускорения резания, скоростей изменения подачи и глубины резания и совпадает с  $\theta_{опт}$  при стационарном тчении (рис. 3).

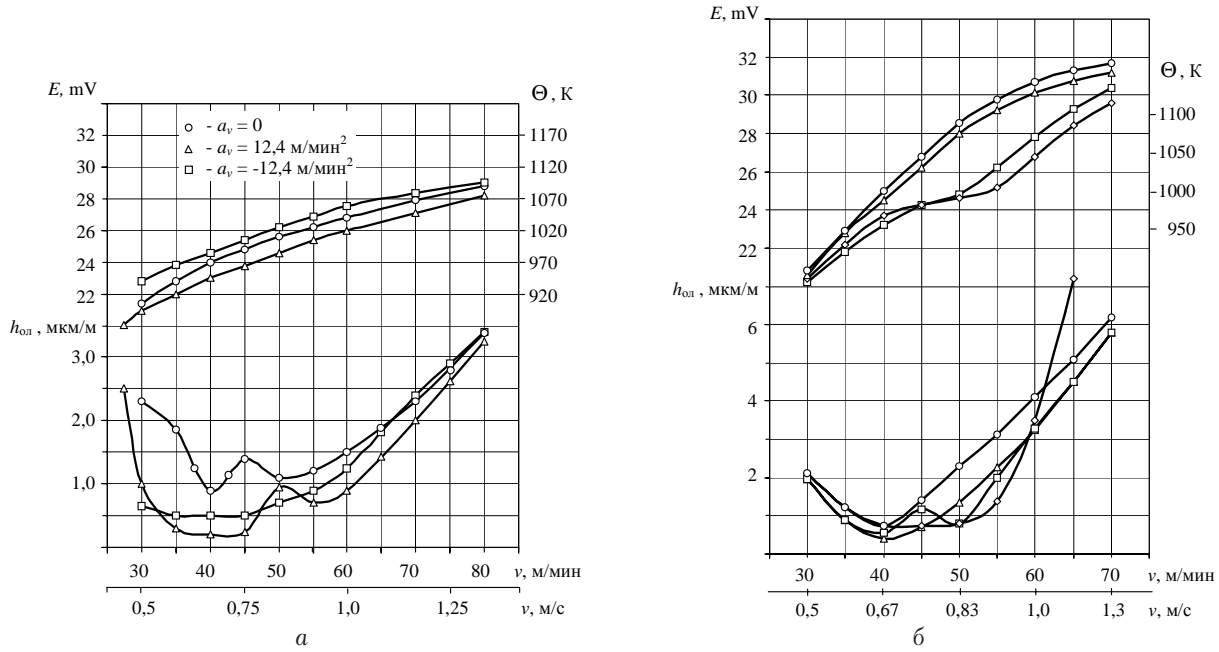


Рис. 3. Влияние скорости и ускорения резания на интенсивность износа инструмента и температуру при точении сплава ХН7ЗМБТЮ резцами ВК8 (а) и ВК6М (б)

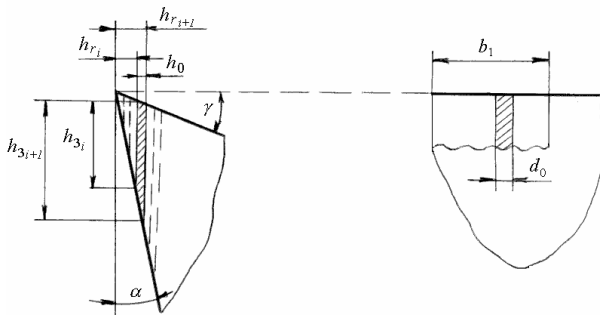


Рис. 4. Схема износа инструмента по задней поверхности: а – вид в главной секущей плоскости; б – вид в плоскости резания

В рамках термодинамического описания процесса формоизменения изнашиваемой поверхности получено выражение для ДФ внутренней энергии приконтактного слоя инструмента:

$$\bar{\Psi}_F = \frac{1}{A_r} \frac{dV_d}{d\tau} \bar{\Psi}_F = \frac{1}{A_r} \frac{dV_d}{d\tau} I_{\Phi}, \quad (4)$$

где  $V_d$  – деформированный объем, связанный с изношенным  $V_h$  объемом соотношением  $V_d = V_h N$ , учитывающим число  $N$  циклов деформации до разрушения;  $I_{\Phi}$  – энергия формоизменения инструментального материала.

Для определения числа  $N$  рассмотрена схема износа инструмента по задней поверхности, представленная на рис. 4.

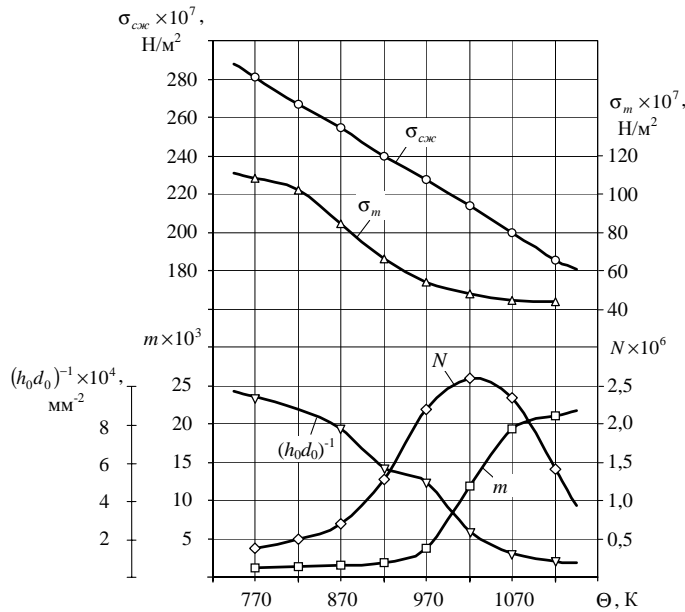
Если принять, что поверхностный слой толщиной  $h_0$  в среднем разрушается за  $m = (\sigma_0/\sigma_{ш})^{tr}$  циклов, а количество таких слоев в пределах ширины зоны контакта (рис. 4, б) равно  $b_1/d_0$ , то общее число циклов, затраченное на разрушение объема  $V_h$

$$N = 0,6213m \frac{b_1 h_r}{d_0 h_0}, \quad (5)$$

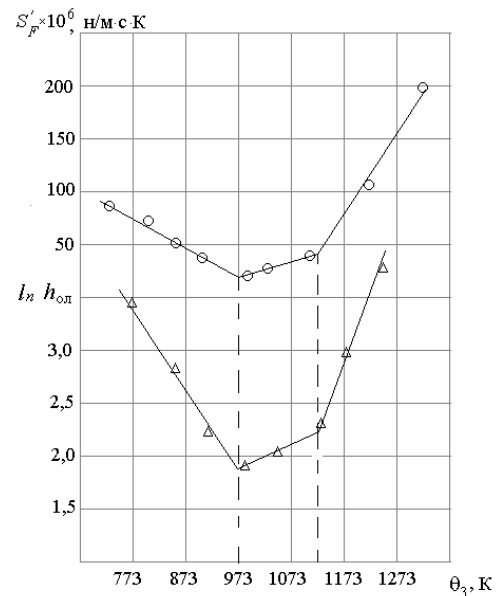
и ДФ формоизменения инструмента при его изнашивании

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{ш}}\right)^{tr} \frac{dh_r}{d\tau} I_{\Phi}. \quad (6)$$

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что интенсивное снижение действующих нагрузок  $\sigma_m$  в зоне температур выше 820 К при практически линейном снижении прочности  $\sigma_{сж}$  сплава ВК8 приводит к росту числа циклов  $m$ , потребных в среднем для разрушения слоя толщиной  $h_0$  при температурах 970 ÷ 1070 К. Замедление снижения  $\sigma_m$  при  $\Theta > 1020$  К вследствие усиления явлений высокотемпературного схватывания контактирующих материалов приводит к снижению интенсивности нарастания  $m$  в зоне высоких температур контакта. В то же время увеличивается площадь поперечного сечения  $h_0 \times d_0$  единичного фрагмента износа вследствие роста критического размера разрушающих микротрещин в зоне высоких температур.



**Рис. 5.** Влияние температуры на параметры фрикционной усталости твердого сплава ВК8 при контактировании с жаропрочным сплавом ХН73МБТЮ ( $v = 0,25 \div 1,25$  м/с,  $t = 0,5$  мм,  $s = 0,11$  мм/об,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $h_n = 0,15$  мм)



**Рис. 6.** Влияние температуры на задней поверхности на скорость производства энтропии в приконтактном слое инструмента и интенсивность его износа при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 ( $S = 0,097$  мм/об,  $t = 0,5$  мм)

Совместное влияние указанных выше факторов приводит к экстремальности зависимости  $N(\Theta)$  при температурах  $990 \div 1030$  К, что соответствует температуре максимума коэффициента адгезии  $f_a$ , диапазону гомологических температур  $(0,6 \div 0,65)\Theta_{пл}$  обрабатываемого материала, при которых наблюдается минимальная интенсивность износа инструмента и максимальная скорость диссипации механической энергии в тепловую.

Выполненные на основании экспериментальных данных расчеты показали практическую инвариантность температурной зависимости  $I_\Phi$  от элементов режима резания и скорости их изменения в процессе обработки.

Определена область минимального производства энтропии в виде температурного диапазона, нижняя граница которого совпадает с температурой максимума релаксационных процессов в модифицированном приконтактном слое обрабатываемого материала, а верхняя — потерей формоустойчивости режущей кромки инструмента. 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 снижается при возрастании общего уровня механической нагруженности контакта инструмента с деталью (рис. 6).

Получено условие минимизации интенсивности износа за счет назначения оптимального темпа изменения скорости резания при минимуме производства энтропии на задней поверхности инструмента, на основании чего предложен способ ускоренного определения оптимального режима нестационарного резания. Из условия сохранения баланса ДФ:  $\psi_p = \chi\psi_d$ , интенсивность изменения скорости резания, компенсирующая увеличение теплосодержания в зоне резания при росте фаски износа (условие термодинамического равновесия):

$$k_v = \frac{dlhv}{d \ln l} = \frac{\chi - 1}{z_p} \times \left[ \frac{q'_F + q_N}{q_N} - \frac{q'_F(z - \Delta/h_3)}{q_N(\chi - 1)} \right], \quad (7)$$

где  $l$  — путь резания;  $z_p$  — показатель степени в зависимости  $P_z(v)$ ;  $q'_F$  и  $q_N$  — средние удельные касательные и нормальная нагрузка на задней и передней поверхности инструмента;  $\Delta$  — длина контакта детали с задней поверхностью при нулевой фаске износа.

Результаты экспериментальной проверки зависимости (8) представлены на рис. 7, показывающем, что в случае управляемой вариации скорости резания для оптимального температурного диапазона  $\theta_{опт} - \theta_{кр}$  период стойкости инструмента  $T$  может быть увеличен в 2 раза при сохранении средней скорости

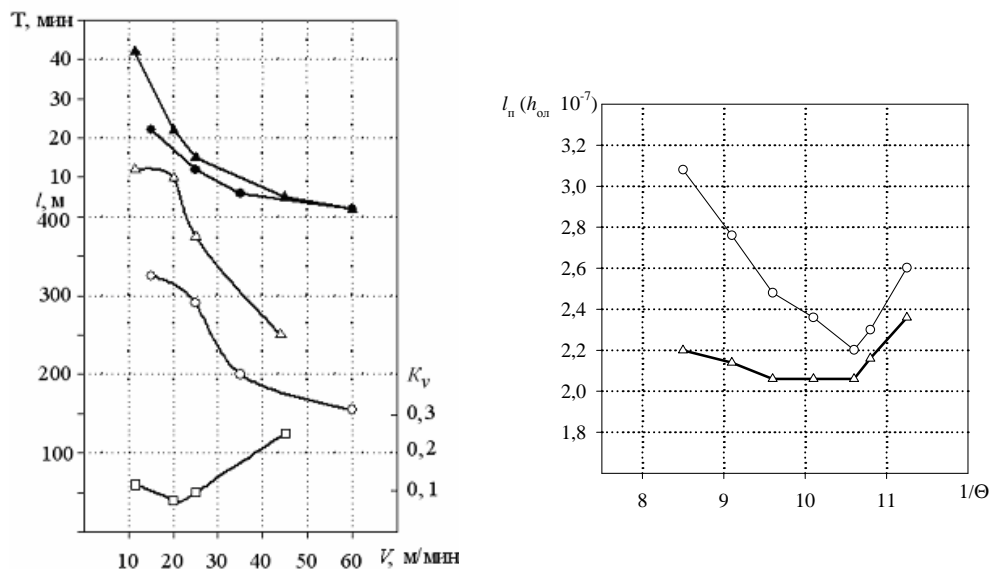


Рис. 7. Влияние скорости и температуры на параметры обрабатываемости при стационарном (o) и нестационарном ( $\Delta$ ) режимах резания сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

резания, или в 1,5–2 раза повышена производительность обработки при постоянном значении пути  $l$  резания до критерия затупления  $h_3 < 0,5$  мм.

Для группы жаропрочных сплавов на никелевой основе определены оптимальные значения  $k_v$  зависимости от содержания в сплаве упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. Лабораторная и промышленная проверки на операциях токарной с ЧПУ обработки дисков и валов ГТД ряда изделий авиадвигателестроения показала возможность повышения средней скорости резания на 15–20% и сокращения расхода инструмента на 15–20%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс исследований позволил выполнить теоретическое обобщение и описание физического и феноменологического механизма взаимодействия и синхронизма механических и тепловых явлений в зоне контакта инструмента с деталью, определяющего условия минимизации интенсивности износа инструмента. Решена важная научная проблема разработки термодинамических принципов обеспечения управляемости и интенсификации нестационарной лезвийной обработки деталей из труднообрабатыва-

емых материалов для повышения эффективности эксплуатации мехатронных станочных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванова, В. С.** Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов / В. С. Иванова. М.: Наука, 1992. 160 с.
2. **Постнов, В. В.** Термодинамические принципы обеспечения управляемости процесса резания / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. Уфа, 2005. № 6 (12). С. 98–106.
3. **Постнов, В. В.** Исследование закономерностей нестационарных процессов резания металлов / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. Уфа, 2000. № 2. С. 203–207.

### ОБ АВТОРЕ



**Постнов Владимир Валентинович**, доц., проф. каф. автоматиз. технол. систем. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по технол. и оборуд. мех. и физ.-техн. обработки (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. нестационарных процессов резания жаропроч. сталей и сплавов.