

В. В. Постнов, Е. Н. Малахов, А. Ю. Федоровцев

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ РЕЗАНИИ

Рассмотрены результаты теоретического и экспериментального исследований процесса трансформации механической энергии в тепловую при резании труднообрабатываемых материалов. Резание, диссипация энергии; энтропия; износ инструмента; структурно-химическая активация

## 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 термо-механических 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.

## 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 из-

менение 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]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{b(h_3 + c_1)} (l \frac{dP_z}{d\tau} + P_z v) = \\ = \frac{n'}{D} 10^5 \rho c \Delta\theta_m (1 - m) h_0 \epsilon' + \\ + \frac{1}{A_p} \left[ \frac{3(1 + \mu) \sigma^2_{-n}}{4E} \right] \frac{dV_d}{d\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

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  $\epsilon'$ ;  $h_0$  – толщина термопластически деформированного слоя материала детали;  $V_d$  – деформированный объем;  $\mu$  и  $E$  – коэффициент Пуассона и модуль

упругости инструментального материала;  $\sigma_{-1}$  – напряжение, обеспечивающее локальные сдвиги в объеме деформируемого слоя материала инструмента.

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

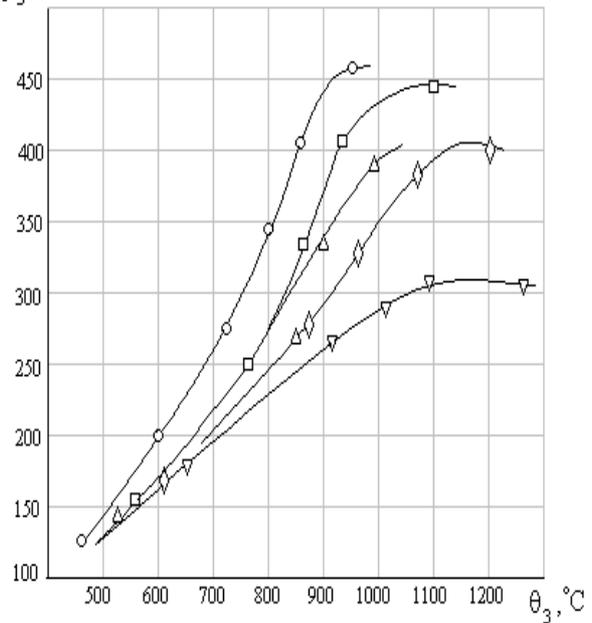
Под синхронизмом следует понимать степень или полноту реакции системы на внешнее воздействие, в данном случае, соответствие количества выделившегося в процессе резания тепла подведенной механической энергии.

Необратимость диссипативных процессов обеспечивается соответствующими потоками энтропии [2]. На рис. 1 представлены температурные зависимости производства энтропии  $\bar{S}'_{p3} = \bar{\Psi}_{p3} / \theta$  от действия внешних сил и скорости ее изменения, обусловленной тепловыми процессами  $\bar{S}'_{d3} = \bar{\Psi}_{d3} / \theta$  при различных фасках износа  $h_3$  и скоростях резания, рассчитанные по уравнению 2.

Полученные данные показывают, что с увеличением скорости резания (температуры задней поверхности  $\theta_3$ )  $\bar{S}'_{p3}$  и  $\bar{S}'_{d3}$  возрастают. При этом рост фаски износа вызывает снижение уровня зависимости  $\bar{S}'_{p3}(\theta_3)$  тем большее, чем выше температура контакта. Для зависимости  $\bar{S}'_{d3}(\theta_3)$  аналогичное поведение наблюдается только до температур порядка 1220 К. В зоне высоких температур  $\bar{S}'_{d3}$  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 стойкости для твердого сплава ВК8, используемого в данном случае в качестве инструментального материала. 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. 2) передней поверхности (рис. 3), на основании температурных зависимостей  $\bar{S}'_{p_i}$  и  $\bar{S}'_{d_i}$  (рис. 1) для различных сочетаний

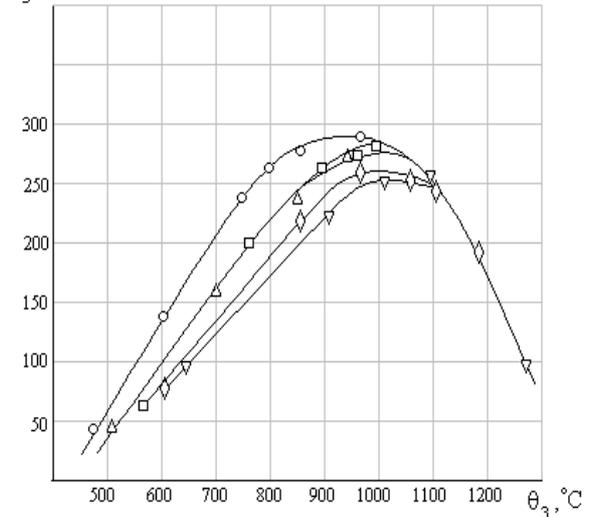
скоростей резания и высоты  $h_3$  фаски задней поверхности инструмента.

$\bar{S}'_{p3} \times 10^3$ , Н/м·с·К



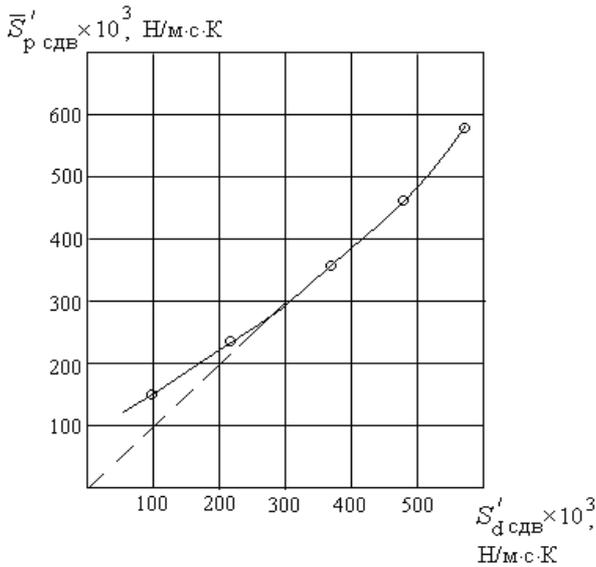
*a*

$\bar{S}'_{d3} \times 10^3$ , Н/м·с·К

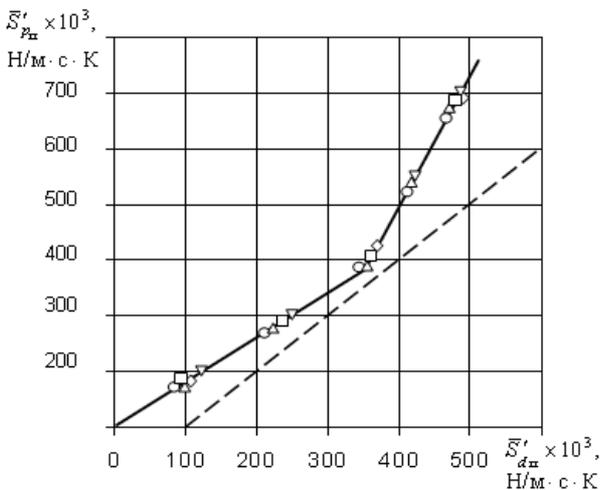


*б*

**Рис. 1.** Зависимость производства энтропии  $\bar{S}'_{p3}$  (*a*) и  $\bar{S}'_{d3}$  (*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



**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 тепловую при условии  $\bar{S}'_p = \bar{S}'_d$ .

$$\Delta\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_p - \bar{\Psi}_d. \quad (3)$$

Представленные на рис. 2, 3 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 (рис. 2). В диапазоне высоких скоростей (температур) контакта  $\bar{S}'_p = \bar{S}'_d$ .

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  $\bar{S}'_d$ .

Полученная зависимость  $\bar{S}'_{p3}(\bar{S}'_{d3})$  позволяет сделать заключение о существовании энергетически оптимальной зоны эксплуатации режущего инструмента, в пределах которой наблюдается наиболее полная диссипация механической энергии в тепловую и отвод ее из зоны контакта термопластически деформированным приконтактным слоем  $h_{\theta_3}$  обработанной поверхности детали. Указанная зона ограничена с одной стороны оптимальной температурой резания  $\theta_0$ . Под оптимальной температурой (скоростью)  $\theta_0(V_0)$  понимается температура (скорость), при которой интенсивность износа инструментального материала минимальна [3]. Верхняя температурная граница, по-видимому, соответствует температуре потери формоустойчивости задней поверхности инструмента [4] и связана с началом интенсивного диффузионного износа режущего инструмента.

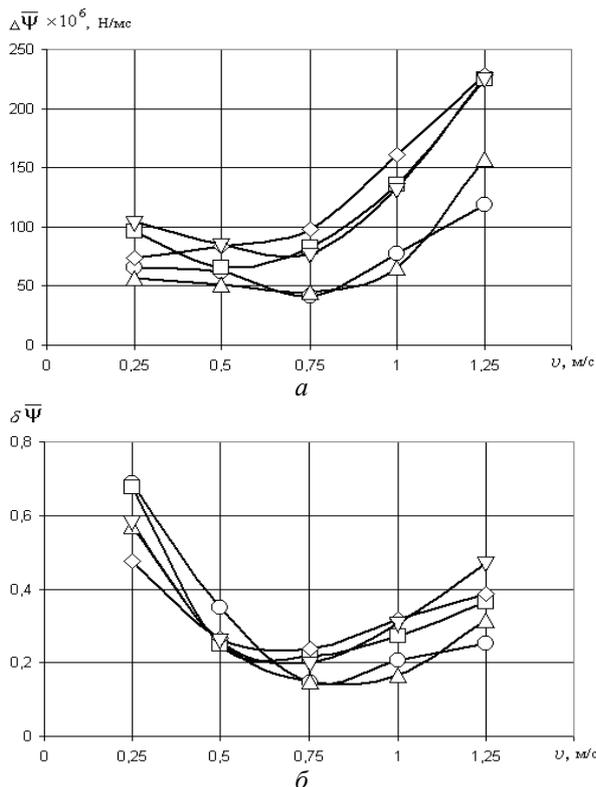
### ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ОБРАБОТКИ

Значительный интерес представляет вопрос о степени превращения механической энергии в тепловую за время существования контакта инструмента с заготовкой при различных скоростях резания. В соответствии с уравнением энергетического баланса (1), абсолютная часть  $\Delta\bar{\Psi}$  механической энергии, не затраченной на тепловыделение в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом, может быть представлена разностью:

Тогда относительную долю  $\delta\bar{\Psi}$  механической энергии можно выразить отношением:

$$\delta\bar{\Psi} = \Delta\bar{\Psi} / \bar{\Psi}_p. \quad (4)$$

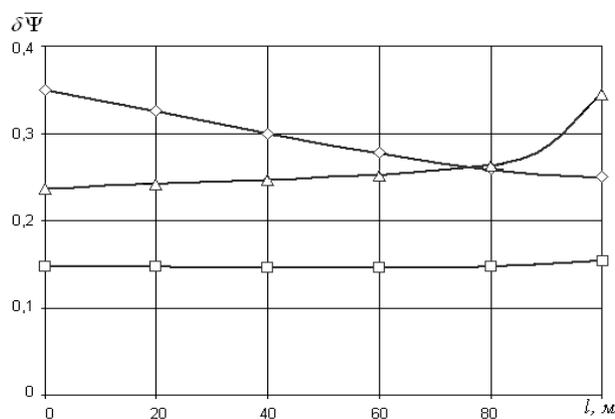
Для наглядного представления полноты перехода механической энергии в тепловую в зависимости от скорости резания и высоты фаски износа по задней поверхности режущего инструмента на рис. 4 представлены абсолютная часть и относительная доля механической энергии, не перешедшей в тепловую в пределах зоны контакта инструмента с деталью за время контактирования.



**Рис. 4.** Влияние скорости резания на абсолютную часть (а) и относительную долю (б) механической энергии при различных фасках износа инструмента (ХН73МБТЮ-ВК8). Условные обозначения аналогичны рис. 1

Из рис. 4 видно, что с увеличением скорости резания наблюдается тенденция стабилизации или некоторого снижения абсолютной части  $\Delta\bar{\Psi}$  механической энергии, при этом относительная доля механической энергии  $\delta\bar{\Psi}$  снижается резко. В зоне оптимальной скорости резания наблюдается минимум величин  $\Delta\bar{\Psi}$  и  $\delta\bar{\Psi}$ . В зоне высоких скоростей резания обе величины возрастают с увеличением фаски износа по задней поверхности.

В целях анализа  $\delta\bar{\Psi}$  необходимо учитывать влияние скорости резания как фактора обеспечивающего подвод механической энергии и отвод тепла со стружкой и приконтактными слоями обрабатываемой поверхности, и пути резания как фактора, косвенно учитывающего затраты энергии на деформацию инструментального материала по мере его износа. По экспериментальным данным, в соответствии с уравнением (2), для трех скоростей резания: оптимальной ( $V_0$ ), выше оптимальной ( $V_2 > V_0$ ) и ниже оптимальной ( $V_1 < V_0$ ), на рис. 5 приведена зависимость относительной доли механической энергии  $\delta\bar{\Psi}$  от пути резания.



**Рис. 5.** Влияние пути резания на относительную долю  $\delta\bar{\Psi}$  механической энергии при различных скоростях резания  $V_1 = 0,5$  м/с ( $\diamond$ ),  $V_0 = 0,75$  м/с ( $\square$ ),  $V_2 = 1,167$  м/с ( $\Delta$ ) (ХН73МБТЮ-ВК8)

При скорости резания  $V_1$  ниже оптимальной по мере износа инструмента по задней поверхности относительная доля  $\delta\bar{\Psi}$  механической энергии, не перешедшей в тепловую снижается с 35 до 25 %. При скорости резания, близкой к оптимальной  $V_0$ ,  $\delta\bar{\Psi}$  изменяется незначительно и имеет минимальное значение, составляя 15 %. С увеличением скорости резания до  $V_2$  относительная доля  $\delta\bar{\Psi}$  механической энергии, не перешедшей в тепловую, повышается с 23 до 28 %. Следует отметить, что на зависимости присутствует участок резкого возрастания  $\delta\bar{\Psi}$ , соответствующий зоне катастрофического износа инструмента.

На основании анализа полученных закономерностей и литературных данных [5, 6], экстремальную зависимость  $\delta\bar{\Psi}$  можно объяснить следующим образом.

Тонкий поверхностный слой материалов детали и инструмента по своим свойствам и структуре отличается от материала в объеме контактирующего тела вследствие аномально высокой концентрации вакансий и плотности дислокаций, играющих роль активных центров твердофазного взаимодействия. В поверхностном слое толщиной порядка сотен нанометров плотность запасенной энергии в единице деформируемого объема будет близка к предельным критическим значениям энергии, которую может поглотить металл в твердой фазе при нагреве до температур, близких к температуре его плавления. Высокая плотность энергии пригомологических температурах  $\theta = (0,4 \div 0,7) \cdot \theta_{пл}$  обуславливает аномальные эффекты структурно-термической активации тонкого поверхностного слоя, протекающие диффузионным путем.

Начальная температура термической активации зависит от химического состава контактирующих материалов (для никеля это  $\sim 820$ – $830$  К, для твердых сплавов  $1020$ – $1090$  К [7]). При некоторой усредненной, в зависимости от сочетания контактирующих материалов и создаваемого ими фрикционного силового поля, температуре резания происходит экстремальное увеличение плотности запасенной энергии в ламинарном тонком приповерхностном слое контакта инструмента с заготовкой.

Поскольку обрабатываемые материалы имеют  $\theta_{пл}$  меньшую, чем  $\theta_{пл}$  инструментальных твердых сплавов, при повышении скорости (температуры) резания от достаточно низких значений ( $< 0,215\theta_{пл}$  обрабатываемого материала) до гомологических  $(0,4 \div 0,5)\theta_{пл}$  обрабатываемого материала, локализация запасенной энергии происходит прежде всего в приконтактных слоях стружки и в зоне контакта детали с задней поверхностью инструмента. В результате этого происходит отток энергии фрикционного (главным образом, адгезионного) взаимодействия материалов детали и инструмента от изнашиваемых поверхностей инструментального материала в виде предпочтительной диссипации механической энергии в стружку. Эта энергия, в соответствии с первым законом термодинамики (1), превращается в тепловую энергию. Факт возрастания количества тепла, уходящего со стружкой при увеличении скорости резания и снижения интенсивности износа инструмента в определенном диапазоне температур является общепризнанным. Таким образом доля механической энергии  $\delta\bar{\Psi}$ , не перешедшей в тепловую,

имеет минимальное значение при  $\theta_0(V_0)$ , соответствующее температуре активации.

При дальнейшем увеличении скорости резания и достижении температуры в зоне контакта порядка  $(0,4 \div 0,5)\theta_{пл}$  инструментального материала возрастает локализация энергии в его приповерхностном контактном слое, происходит перераспределение энергетических потоков в зоне контакта, что может вызвать резкое возрастание интенсивности износа инструмента. Это объясняет зону катастрофического износа на зависимости  $\delta\bar{\Psi}$  в зоне высоких скоростей.

Так как показатель  $\delta\bar{\Psi}$  в данном случае рассчитывался для задней поверхности контакта инструмент–деталь, то большое влияние на его значение оказывает температура в этой зоне, которая, в свою очередь, напрямую зависит от величины фаски износа по задней поверхности режущего инструмента. Это объясняет факт повышения показателя  $\delta\bar{\Psi}$  по мере износа режущего инструмента по задней поверхности при скоростях резания ниже оптимальной, поскольку, возрастая по мере износа, температура приближается к температуре термической активации. И, наоборот, показатель  $\delta\bar{\Psi}$  понижается по мере износа инструмента по задней поверхности из-за того, что, повышаясь, температура резания уходит за пределы выше вышеуказанной зоны.

## ВЫВОДЫ

1. Получена термодинамическая модель контактных процессов в зоне резания, позволяющая рассчитать удельные энергетические потоки и определить степень полноты превращения механической энергии в тепловую.

2. Установлена возможность неполного превращения механической энергии в тепловую в пределах зоны контакта инструмента с деталью, вследствие конечности скорости этого превращения. Установлено, что относительная доля энергии  $\delta\bar{\Psi}$ , не перешедшей в тепловую, по мере увеличения износа инструмента снижается в зоне низких скоростей, возрастает в зоне высоких скоростей и практически не изменяется при оптимальной скорости (температуре) резания. При этом значения  $\Delta\bar{\Psi}$  и  $\delta\bar{\Psi}$  при  $V_0$  минимальны, что обеспечивает наименьшую интенсивность износа инструмента.

3. Факт отставания доли тепла, выделившегося в зоне резания, от механической энергии, затраченной на процесс срезания слоя

стружки, может быть объяснен особенностями энергетических превращений в поверхностных контактных слоях детали и инструмента при гомологических температурах  $\theta/\theta_{пл}$  и обусловлен аномальными эффектами структурно-термической активации, протекающими диффузионным путем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постнов В. В.** Термодинамические принципы обеспечения управляемости процесса резания // Вестник УГАТУ. Уфа, 2005. № 6(12). С. 98–106.
2. **Иванова В. С.** Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 160 с.
3. **Макаров А. Д.** Износ и стойкость ржущего инструмента. М.: Машиностроение, 1966. 264 с.
4. **Лоладзе Т. Н.** Износ режущего инструмента. М.: Машгиз, 1958. 354 с.
5. **Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л.** Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
6. **Рыжкин А. А.** Обработка материалов резанием: физические основы: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 1995. 242 с.

7. **Рюков Д. И.** Исследование влияния состава твердых сплавов на основные параметры оптимального резания при точении жаропрочных сплавов и разработка ускоренных методов их определения: дисс.. канд. техн. наук. Уфа, 1979. 197 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Постнов Владимир Валентинович**, проф. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1972). Д-р техн. наук по технол. и оборуд. мех. и физ. тех. обработки (УГАТУ, 2005). Иссл. в области нестационарных процессов резания жаропрочных сталей и сплавов

**Малахов Евгений Николаевич**, асп. той же каф. Дипл. инженер по мехатронике (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. диссипации энергетических потоков при лезвийной обработке.

**Федоровцев Александр Юрьевич**, асс. той же каф. Дипл. инженер по мехатронике (УГАТУ 2007). Иссл. в обл. вибрационной составляющей процесса резания.