

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

УДК 621.9.01

В. И. ДЕРЯБИН, В. В. ПОСТНОВ, Н. Н. СУХАНОВА**ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ
НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЗАНИЯ
ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Проведен анализ влияния подачи на термодинамические критерии оценки температурно-силовой нагруженности зоны контакта инструмента с деталью. Установлено существование критической подачи, влияющей на стабилизацию удельной механической нагруженности зоны контакта инструмента с деталью. Рассмотрена возможность достижения минимизации интенсивности износа инструмента за счет изменения подачи и скорости ее изменения в процессе резания. *Нестационарность резания; износ инструмента*

Многообразие технологических схем лезвийной обработки деталей сложной конфигурации из жаро- и особопрочных материалов на мехатронных станочных модулях и станках с ЧПУ позволяет трактовать их как управляемый нестационарный процесс, предъявляющий новые требования к виду и методам установления физико-математических зависимостей между переменными входными управляющими воздействиями и выходными параметрами процесса, обеспечивающими его технико-экономическую эффективность.

Анализ технологии изготовления деталей в условиях реального производства показал, что при точении сложнофасонных деталей толщина срезаемого слоя является переменной величиной. Уровень и характер изменения толщины срезаемого слоя или подачи инструмента определяет температурно-силовую нагруженность зоны резания, качество и экономичность процесса обработки. В связи с вышеизложенным использование влияния подачи на термодинамические критерии нестационарного резания труднообрабатываемых материалов является весьма актуальным.

**1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ
ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОЙ
НАГРУЖЕННОСТИ ЗОНЫ КОНТАКТА
ИНСТРУМЕНТА С ДЕТАЛЬЮ**

Под нестационарной лезвийной обработкой понимается процесс срезания единичного слоя

припуска, при котором технологические параметры (элементы режима резания, геометрии инструмента и т. д.) изменяются во времени непрерывно или дискретно.

Нестационарный режим резания определяется в каждый момент времени текущими значениями скорости резания v_i , подачи S_i или толщины срезаемого слоя a_i , а также их производными по времени τ [1]:

$a_s = dS/d\tau$ – скорость изменения подачи;

$a_a = da/d\tau$ – скорость изменения толщины срезаемого слоя.

При нестационарных режимах резания вследствие переменности v и S происходит изменение фактической геометрии режущей части инструмента $\alpha, \gamma, \phi, \lambda$ с соответствующими скоростями $a_\alpha, a_\gamma, a_\phi, a_\lambda$.

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

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{A_r} \frac{du_i}{d\tau} = \theta \frac{\overline{dS_i}}{d\tau} = (\Delta\sigma_i) J_i. \quad (1)$$

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

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

В качестве параметров, характеризующих термодинамические структурно-чувствительные свойства контактирующих материалов, отражающих физико-химическую природу процессов, протекающих в деформируемых локальных объемах, предложено использовать относительные безразмерные термодинамические критерии оценки температурно-силовой нагруженности зоны контакта инструмента с деталью:

- коэффициент трансформации энергии $\chi = \bar{\Psi}_d / \bar{\Psi}_p$, характеризующий способность обрабатываемого материала необратимо превращать затраченную механическую энергию в тепловую;

- коэффициент поглощения энергии $\delta = \bar{\Psi}_F / \bar{\Psi}_p$, характеризующий способность изнашиваемого инструментального материала необратимо поглощать затраченную энергию.

Таким образом, уравнение баланса диссипативных функций в критериальном виде

$$\chi(\tau) + \delta(\tau) = 1. \quad (3)$$

Механическая работа, затрачиваемая на процесс резания, в значительной степени (от 95% до 99,5%) трансформируется в тепловую энергию, а также частично поглощается стружкой и приконтактными слоями обрабатываемого и инструментального материалов в виде скрытой или накопленной энергии деформации [2] в форме потенциальной энергии искажений кристаллической решетки деформированного слоя контактирующих материалов. Энергия, накопленная в приконтактных слоях инструментального материала, достигая некоторого критического уровня [5], приводит к формоизменению и износу режущего инструмента.

Таким образом,

$$\chi = \bar{\Psi}_d / \bar{\Psi}_p = 0,95 \div 0,995;$$

$$\delta = \bar{\Psi}_F / \bar{\Psi}_p = 0,05 \div 0,5.$$

Условием минимальной интенсивности износа инструмента является наиболее полная диссипация механической $\bar{\Psi}_p$ энергии в тепловую $\bar{\Psi}_d$, т. е. коэффициент трансформации энергии $\chi \rightarrow 1$, коэффициент поглощения энергии $\delta \rightarrow 0$.

2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОДАЧИ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ

Рассмотрим влияние сечения срезаемого слоя на термодинамические критерии с точки зрения минимальной интенсивности износа инструмента.

При обработке с переменной подачей (толщиной срезаемого слоя) диссипативная функция $\bar{\Psi}_p$ сил резания из уравнения может быть представлена в виде:

$$\bar{\Psi}_p = \frac{1}{b(h_3 + c_1)} \left[P'_z v \left(1 + y_{P_z} \frac{\Delta S}{S} \right) + \bar{q}'_F b h_3 v \frac{\Delta S}{S} \times \left(\frac{d \ln h_3}{d \ln S} - y_{P_z} \right) \right], \quad (4)$$

где b – ширина срезаемого слоя, мм; h_3 – высота фаски износа инструмента по задней поверхности с учетом радиуса округления режущей кромки, мм; $c_1 = S \sin \varphi [k_a (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]$ – длина зоны пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента [1]; k_a – коэффициент утолщения (усадки) стружки; P'_z – тангенциальная составляющая силы стружкообразования, Н; v – скорость резания, м/с; y_{P_z} – показатель степени в аппроксимационной зависимости $P'_z = c_{P_z} \cdot S^{y_{P_z}}$; S – подача, мм/об; ΔS – приращение подачи, мм/об; \bar{q}'_F – удельные касательные нагрузки.

При постоянной скорости резания увеличение подачи приводит к одновременному увеличению P'_z и c_1 , но при несколько опережающем темпе роста длины c_1 зоны контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Сомножитель $\left(1 + y_{P_z} \frac{\Delta S}{S} \right)$ является нелинейной функцией подачи, достаточно интенсивно возрастающей в зоне малых относительных изменений $\Delta S_i / S_i$ подачи. Поскольку коэффициент усадки стружки k_a в принятом диапазоне скоростей (температур резания) наиболее интенсивно изменяется также в зоне малых

толщин среза (рис. 1), суммирование перечисленных выше факторов взаимно противоположного влияния подачи инструмента на диссипативную функцию $\bar{\Psi}_p$ приводит к тому, что с увеличением подачи и износа инструмента энергетическая нагруженность зоны резания вначале возрастает, но при достижении определенного значения $S_{кр}$ наступает практическая стабилизация $\bar{\Psi}_p$ (рис. 2), причем до определенного значения скорости изменения подачи ($a_v = 0,04$ мм/об·мин) уровень зависимостей $\bar{\Psi}_p(S)$ мало отличается от $\bar{\Psi}_p(S)$ для стационарного режима резания.

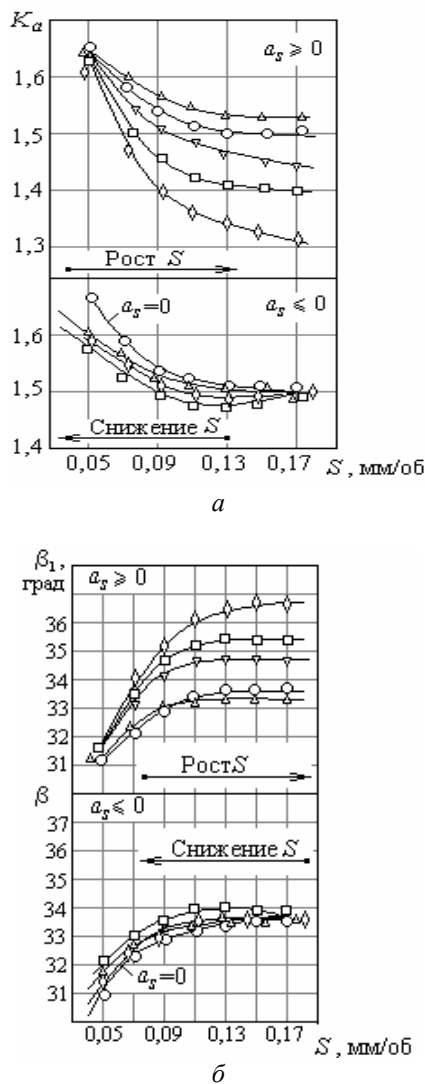


Рис. 1. Влияние скорости изменения подачи на коэффициент утолщения стружки (a) и угол сдвига (b) при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 ($v = 0,5$ м/с, $t = 0,5$ мм): $\circ - a_s = 0$ мм/об·мин; $\Delta - a_s = \pm 0,005$ мм/об·мин; $\square - a_s = \pm 0,015$ мм/об·мин; $\diamond - a_s = \pm 0,02$ мм/об·мин; $\nabla - a_s = \pm 0,04$ мм/об·мин

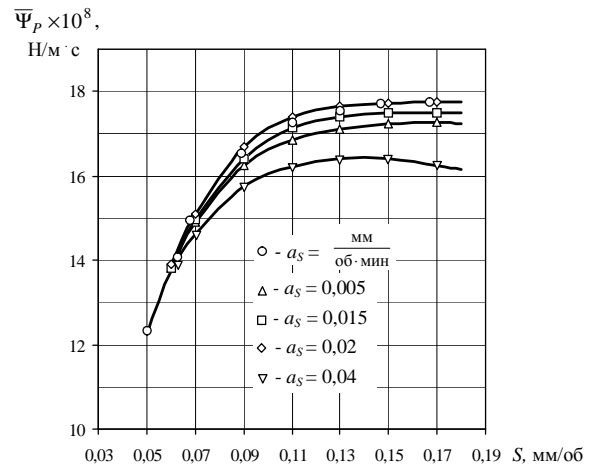


Рис. 2. Влияние величины и скорости изменения подачи инструмента на скорость изменения затраченной энергии при точении сплава ХН73МБТЮ резцом ВК8 ($v = 0,66$ м/с; $t = 0,5$ мм)

Условие стабилизации $\bar{\Psi}_p(S)$ в первом приближении может быть найдено из выражения (4) без учета вклада удельных касательных нагрузок \bar{q}'_F на задней поверхности инструмента для случая равенства нулю первой производной $\bar{\Psi}_p/dS$, в виде соотношения:

$$\left[\frac{d \ln(h_3 + c_1)}{d \ln S} \right] = y_p \left[1 + \frac{S_0}{S_{кр} \left(1 + y_p \frac{S_{кр} - S_0}{S_{кр}} \right)} \right] \quad (5)$$

между интенсивностью изменения суммарной площади контакта b ($h_3 + c_1$) инструмента с деталью по мере изменения подачи и некоторым критическим значением $S_{кр}$ подачи инструмента с учетом влияния (y_p) скорости изменения подачи на силу резания.

Стабилизация $\bar{\Psi}_p$ в диапазоне подач выше $S_{кр}$ связана с опережающим влиянием интенсивности нарастания фаски износа и вклада сил трения по задней поверхности инструмента по отношению к росту длины c_1 пятна контакта передней поверхности резца со стружкой и увеличением силы резания $P_z(S)$.

Диссипативная функция теплообразования при пластической деформации в общем случае может быть выражена в виде

$$\bar{\Psi}_{d_i} = 10^5 \lambda_{ср} \Delta \theta_M^2 f_\theta \frac{m_p}{(1 + m_p) \sigma_b}, \quad (6)$$

где $\Delta \theta_M$ – приращение температуры, модифицированной по скорости деформации; λ –

коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, кал/см · с · °С; ρ – плотность материала, Н/м³; f_θ – функция, учитывающая градиенты скорости движения и температуры по нормали к поверхности контакта; m_p – коэффициент упрочнения деформируемого материала при сдвиговых деформациях.

Из уравнения (6) очевидно, что при стабилизации диссипативной функции сил резания $\bar{\Psi}_p$ (по достижению $S_{кр}$) диссипативная функция теплообразования при пластической деформации $\bar{\Psi}_d$ продолжает возрастать за счет увеличения $\Delta\theta_M$ и функции f_θ (так как увеличивается температура в зоне резания), что указывает на то, что в этом диапазоне подач происходит возрастание трансформации и диссипации механической энергии $\bar{\Psi}_p$ в тепловую $\bar{\Psi}_d$ из зоны контакта инструмента с деталью.

Как показывает анализ уравнений (4) и (6), условие наиболее полной диссипации механической энергии $\bar{\Psi}_p$ в тепловую $\bar{\Psi}_d$ определяется в основном немонотонностью зависимости функции f_θ , учитывающей условия локализации температуры в приконтактных слоях обрабатываемого материала.

Функция f_θ , входящая в уравнение (6) для расчета диссипативной функции пластической деформации, учитывающая градиенты скорости движения и температуры по нормали к поверхности контакта, определяет интенсивность отвода тепловой энергии из зоны контакта детали и инструмента:

$$f_\theta = \frac{\varepsilon'}{v} c_{cp} = \left[\frac{\theta}{\theta_A} (n+1) \exp(-k_d) - \frac{\omega}{c_{cp} v \cos \gamma} \ln \left(\frac{\theta}{\theta_A} \right) \right], \quad (7)$$

где θ – температура резания, К; θ_A – максимальная температура в зоне стружкообразования, К; c_{cp} – толщина текучего (заторможенного) слоя стружки в зоне ее пластического контакта с передней поверхностью инструмента, мм; k_d – коэффициент концентрации теплоты в ламинарном слое; ω – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с; γ – передний угол инструмента, град.

Скорость деформации в зоне максимального тепловыделения на передней поверхности инструмента можно записать в несколько упрощенном виде:

$$\varepsilon' = \frac{v}{0,215ak_a^2} \left[\frac{\theta(\theta_{пл} - \theta)}{c_s \theta_{пл}^2} - \frac{4,65}{Pe \cdot \cos \gamma} \times \ln \left(\frac{4,65 \cdot \theta}{\theta_{пл}} \right) \right], \quad (8)$$

где $\theta_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала, К; k_a – коэффициент утолщения (усадки) стружки; a – толщина срезаемого слоя, мм; c_s – относительная толщина зоны стружкообразования, мм; Pe – безразмерный критерий Пекле, $Pe = \frac{v \cdot a}{\omega}$;

$$\varepsilon' = \varepsilon'_d \cdot f_\theta, \quad (9)$$

где

$$f_\theta = 9,3 \frac{\theta(\theta_{пл} - \theta)}{\theta_{пл}^2} - \frac{4,65}{Pe \cdot \cos \gamma} \cdot \ln \left(\frac{4,65\theta}{\theta_{пл}} \right) \quad (10)$$

– безразмерный критерий, учитывающий влияние температуры, градиента скоростей, толщины среза и температуропроводности обрабатываемого материала на скорость деформации; $\varepsilon'_d = \frac{v}{0,215ak_a^2}$ – средняя скорость деформации, рассчитанная по формуле, предложенной Г. Н. Лоладзе [3].

Выражение (8) фактически представляет собой скорость деформации, модифицированную по температуре резания. Критерий f_θ включает в себя две составляющие, первая из которых $\frac{\theta(\theta_{пл} - \theta)}{\theta_{пл}^2}$ имеет максимум при $\theta = 0,5 \times$

$\times \theta_{пл}$, а вторая составляющая представляет собой гиперболическую кривую, интенсивность снижения которой с увеличением скорости резания или толщины срезаемого слоя контролируется скоростью нарастания температуры резания в выражении $\ln \left(\frac{4,65 \cdot \theta}{\theta_{пл}} \right)$. Для жаро- и

особопрочных сталей и сплавов, характерной особенностью которых является значительный прирост температуры при сравнительно малых изменениях v и a , интенсивность изменения второй составляющей меньше, чем для обычных машиноподелочных сталей. Положение максимума f_θ по оси температур можно определить из условия равенства нулю первой производной выражения (8), которое с учетом зависимости $\theta = C_\theta \cdot v^{x_\theta}$ позволяет получить следующее уравнение:

$$(n+1) \frac{\theta_{пл} - 2\theta}{\theta_{пл}^2} = \frac{\omega}{v \cdot a \cdot \cos \gamma \cdot \theta} \times \left[1 - \frac{1}{x_\theta} \ln \left(\frac{4,65 \cdot \theta}{\theta_{пл}} \right) \right] \quad (11)$$

или, приняв в качестве переменной безразмерную температуру $\theta^* = \theta / \theta_{пл}$, при $n = 1$

$$\theta^* - 2(\theta^*)^2 = \frac{\omega}{2a \cdot \cos \gamma} \left(\frac{C_\theta}{\theta_{пл} \cdot \theta^*} \right)^{\frac{1}{x_\theta}} \times \left[1 - \frac{1}{x_\theta} \cdot \ln 4,65 \cdot \theta^* \right], \quad (12)$$

где x_θ – показатель степени, учитывающий интенсивность влияния скорости на температуру резания.

Точное решение полученного трансцендентного уравнения (12) представляет значительные трудности, поэтому целесообразно использовать графические или приближенные методы определения действительных значений $\theta_{x\text{кр}}$ (методы линейной интерполяции, итераций или метод Ньютона [6]). На рис. 3 представлено графическое решение уравнения (12) для случаев обработки стали ХН77ТЮР резцом ВК6М. При этом левая часть уравнения (12) представлена единой монотонно снижающейся кривой $\theta^* - 2(\theta^*)^2$, а его правая часть для различных сечений срезаемого слоя представлена монотонно возрастающими кривыми. Точки пересечения этих зависимостей представляют собой с достаточной точностью решения уравнения (10), т. е. значения относительной температуры $\theta_{кр} / \theta_{пл}$, при которых наблюдается максимум функции f_θ по уравнению (10).

Для различных сечений срезаемого слоя, как показано на рис. 3, критическая температура изменяется в весьма малых пределах. При восьмикратном изменении толщины срезаемого слоя диапазон изменения $\Delta\theta_{кр} = \pm 17$ К, что находится в пределах погрешности измерения температуры методом естественной термопары, а среднее значение $\theta_{кр} \approx 0,573 \cdot \theta_{пл} = 988$ К соответствует условиям минимальной интенсивности износа инструмента [6] и оптимальному значению энергетического критерия

$$A = \frac{a \cdot b \cdot c \cdot \rho \cdot \theta}{P_z} \quad [4].$$

При сопоставлении температур $\theta_{кр}$ с оптимальными по интенсивности износа температурами резания для различных

сочетаний материалов детали и инструмента (табл. 1) очевидна их достаточная сходимость (отклонение не более 7%).

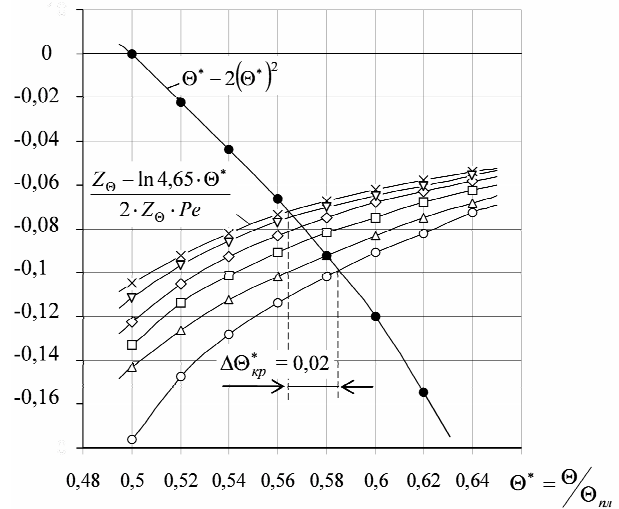


Рис. 3. Влияние относительной температуры и подачи инструмента на составляющие уравнения (12) при точении сплава ХН77ТЮР резцом ВК6М ($v = 0,5$ м/с; $t = 0,5$ мм): $\circ - S = 0,07$ мм/об; $\Delta - S = 0,11$ мм/об; $\square - S = 0,15$ мм/об; $\diamond - S = 0,19$ мм/об; $\nabla - S = 0,23$ мм/об; $\times - S = 0,28$ мм/об

Таблица 1
Сопоставление температур $\theta_{кр}$ и θ_o для различных сочетаний обрабатываемых и инструментальных материалов

Обрабатываемый материал	Инструментальный материал	Температура, К		Отношение $\frac{ \theta_{кр} - \theta_o }{\theta} \times 100\%$
		$\theta_{кр}$	$\theta_{онт}$	
ХН35ВТЮ-ВД	Т15К6	996	1070	6,9
	ВК8	917	950	3,5
	ВК100М	970	970	0
	ВК10ХОМ	1005	1000	0,5
ВТ3-1	Т15К6	1048	1020	2,7
	ВК8	1006	1000	0,6
	ВК100М	1030	1020	1,0
	ВК10ХОМ	1040	1020	1,9
ХН73МБТЮ	ВК8	963	990	2,2
	ВК6М	1020	1000	2

Таким образом, максимум критерия χ_θ в определенном диапазоне температур резания можно объяснить условиями структурно-термической активации и предельной локализации энергии, запасенной приконтактными слоями материалов детали и инструмента. Максимальное значение χ_θ соответствует условиям максимально быстрого отвода (диссипации) затраченной механической энергии, подведенной к локальному контакту обрабатываемого и

инструментального материалов, в обрабатываемый материал, снижения энергетической нагруженности приконтактных слоев инструмента и, следовательно, минимизации интенсивности его износа в диапазоне температур, близких к $\theta_{кр}$.

Об этом свидетельствует существование минимума интенсивности износа при определенной, постоянной для данной пары материалов инструмента и детали оптимальной температуре резания [6], экспериментально и теоретически подтвержденное многими исследователями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При точении с переменной подачей инструмента затраты механической энергии на процесс резания изменяются немонотонно; установлен эффект стабилизации диссипации механической энергии $\bar{\Psi}_p$ при достижении определенного критического значения подачи в исследуемом диапазоне, где может наблюдаться снижение интенсивности износа режущего инструмента вследствие существования оптимальных температурно-ресурсных зон.

2. Управление состоянием термодинамической нагруженности приконтактных слоев инструмента изнашиваемых поверхностей инструмента возможно как за счет изменения сечения срезаемого слоя, так и скорости его изменения в процессе резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Подураев, В. Н.** Обработка резанием жаропрочных и нержавеющей материалов / В. Н. Подураев. М.: Высшая школа, 1965. 520 с.
2. **Старков, В. К.** Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В. К. Старков. М.: Машиностроение, 1984. 120 с.
3. **Лоладзе, Т. Н.** Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. М.: Машгиз, 1958. 354 с.
4. **Силин, С. С.** Теория подобия в приложении к технологии машиностроения : Учеб. пособие / С. С. Силин. Ярославль 6 ЯПИ, 1989. 108 с.
5. **Рыжкин, А. А.** Обработка материалов резанием: физические основы: Учеб. пособие / А. А. Рыжкин. Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 1995. 242 с.
6. **Макаров, А. Д.** Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

7. **Денисов, В. И.** Математическое обеспечение системы ЭВМ – экспериментатор (регрессионный и дисперсионный анализы) / В. И. Денисов. М.: Наука, 1977. 251 с.

8. **Постнов, В. В.** Интенсификация нестационарного резания труднообрабатываемых материалов на основе оптимизации термодинамических условий изнашивания режущего инструмента : дисс... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / В. В. Постнов.

ОБ АВТОРАХ



Дерябин Владимир Иванович, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1962). Канд. техн. наук по двигат. летат. аппаратов и их технологии (НИАТ, Москва, 1973). Иссл. в обл. технологич. методов повыш. долгов. дет. машин.



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



Суханова Наталья Николаевна, асп., асс. той же каф. Дипл. инж. по мехатронике (УГАТУ, 2007). Готовит дисс. в обл. нестационарного резания труднообрабатываемых материалов.