

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

УДК 681.5:621.91

В. Ц. ЗОРИКТУЕВ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ
НА ОСНОВЕ ПОЛОЖЕНИЯ
ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ РЕЗАНИЯ**

В статье дается обоснование необходимости управления процессом резания с обеспечением постоянства оптимальной температуры в процессе резания. Обосновывается требуемая точность поддержания этой температуры, определяется область эффективного управления с таким алгоритмом, а также дается история и география внедрения разработок систем управления. *Оптимальная температура резания; система автоматического управления; процесс резания*

Обоснование в начале 60-х гг. XX в. профессором А. Д. Макаровым положения об оптимальной температуре резания [1] послужило технологической основой создания систем автоматического управления (САУ) процессом резания (ПР). Разработанные в начале 70-х гг. того же столетия первые образцы САУ ПР в Уфимском авиационном институте и Рыбинском авиационно-техническом институте показали эффективность управления процессом резания с поддержанием температуры резания на постоянном оптимальном уровне (или соответствующей ей термо-ЭДС резания E_0). Так, путь резания (или площадь обработанной поверхности с постоянной подачей) более чем в 1,5 раза увеличивается при обработке с $E_0 = \text{const}$ по сравнению с обработкой с постоянной оптимальной скоростью резания ($V_0 = \text{const}$) (табл. 1) [2].

Торцовое точение дисков с $E_0 = \text{const}$ [3] позволило обеспечить не только минимальный уровень шероховатости (Rz), параметров наклепа (глубины hc и степени $N\%$) при заданных величинах глубины резания и подачи инструмента (для условий числового отсчета), но и постоянный уровень Rz , hc , N и остаточных напряжений вдоль всего обработанного полотна диска (рис. 1).

Как известно [4], обеспечение минимального уровня параметров наклепа обуславливает повышение усталостной прочности при высокотемпературной эксплуатации деталей авиадвигателей, а минимальная шероховатость

предопределяет повышение коррозионной стойкости. Постоянство уровня остаточных напряжений по полотну диска обеспечивает уменьшение вероятности коробления тонкостенных дисков при их изготовлении и эксплуатации. Стабилизация температурного режима зоны резания благоприятно сказывается на динамике контактных процессов на поверхностях инструмента и детали, а через них – на уменьшении интенсивности износа инструмента и формировании поверхностной структуры деталей с меньшим уровнем дефектов.

Таким образом, ведение процесса резания с обеспечением постоянства температуры резания при обработке позволяет резко повысить производительность обработки с одновременным получением деталей с высокими эксплуатационными свойствами, что предопределяет повышение ресурса работы наиболее ответственных деталей таких изделий, как авиадвигатели.

Для обеспечения таких свойств обработанных поверхностей требуется высокая статическая точность систем автоматического управления (САУ) процессом резания (ПР) по температуре резания θ (табл. 2). Для обеспечения требуемого уровня указанных параметров качества обработанной поверхности, необходимо обеспечить отклонение от уровня оптимальной температуры резания θ_0 не более 200°C , а отклонение термо-ЭДС должно $\Delta E \leq 0,5$ мВ.

Для этого необходимо [5]:

1. Обеспечить такой технологический процесс изготовления режущих пластин на заводах-изготовителях и сортировку их у потребителя, чтобы разброс термо-ЭДС пластин ($\Delta E_{\text{пласт}}$) не превышал 0,1 мВ.

Таблица 1

Эффективность процесса точения с $E_0 = \text{const}$

Обрабатываемый материал – материал резца	$V = \text{const}$		$E = \text{const}$		$\frac{l_{e_0}}{l_{v_0}}$
	$V = V_0$ м/мин	Путь резания l_{v_0} ($h_3 = 0,5$ мм)	$E = E_0 m B$	Путь резания ($h = 0,5$ мм)	
ЭП220-ВК6М	40	136	32	220	1,62
ЭИ598-ВК8	30	68	24,5	113	1,66

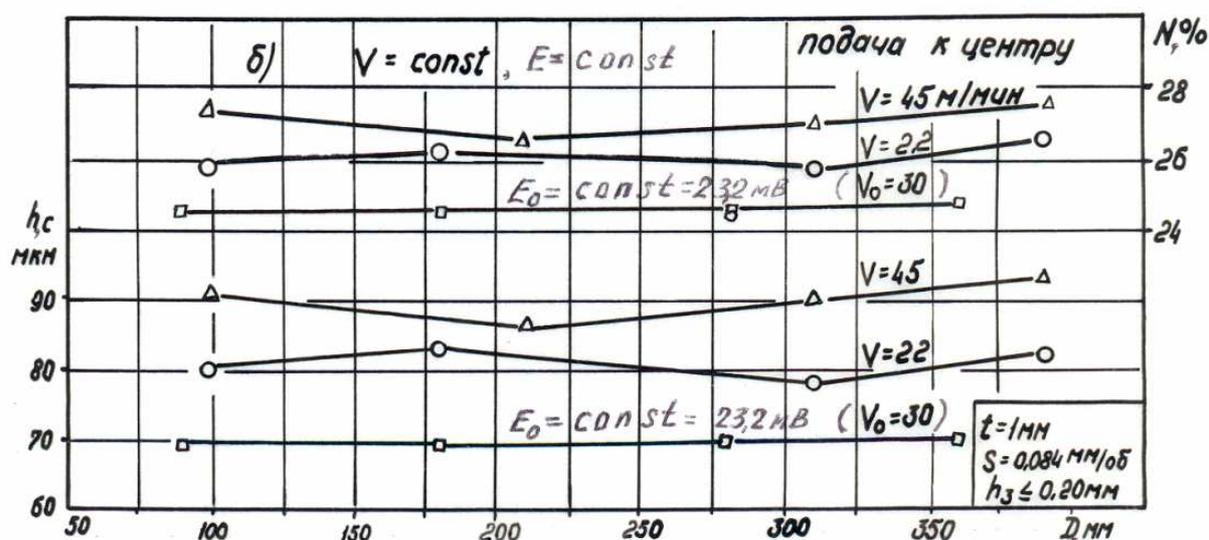


Рис. 1. Распределение параметров наклепа по полотну обработанного диска при торцовом точении ХН77ТЮР-ВК6М

2. Устранить шунтирующее действие стружки (например, обеспечить образование стружки скола).

3. Устранить влияние паразитной термо-ЭДС «режущая пластина-державка» (например, применение охлаждающей жидкости при обработке)

Область эффективного применения автоматического управления процессом резания по температуре резания (средней термо-ЭДС контакта) определяется условиями обработки, когда температуры на контактных поверхностях инструмента близки или когда средняя температура резания определяется в основном температурой на одной из поверхностей контакта «инструмент-деталь» (КИД) [6]. Проведенные расчеты электропроводимостей контактных поверхностей [5, 6] и эксперименты [6] позволяют заключить:

1. Соотношения средних температур и средних термо-ЭДС по задней и передней по-

верхности инструмента со средней температурой (средней термо-ЭДС) КИД определяется отношением электрических проводимостей G_n/G_3 поверхностей инструмента и зависят от характера отношений, следовательно, от всех факторов, определяющих величины G_n/G_3 и $\theta_n/\theta \cdot E_n/E_3$. Основными из них являются: скорость резания, износ инструмента, толщина и ширина сечения среза, технические и теплофизические свойства обрабатываемого и инструментального материалов.

При обработке со стабилизацией термо-ЭДС КИД увеличение подачи приводит к уменьшению средней температуры (термо-ЭДС) по задней поверхности. С увеличением ширины фаски, срока износа по задней поверхности инструмента температура на передней поверхности будет в большинстве случаев уменьшаться.

Таблица 2

Изменение параметров процессов резания при увеличении температуры по отношению к Θ_0 на 200°C

Параметры		Материал заготовки, инструмента		
		Сталь ЭИ-961 Т15К6 $t = 0,5$ мм $S = 0,21$ мм/об $[h_3] = 0,7$ мм	ХН77ТЮР-ВК6М $t = 1$ мм $S = 0,084$ мм/об $[h_3] = 0,5$ мм	ХН51ВМТЮКФР-ВК6М $t = 0,5$ мм $S = 0,21$ мм/об $[h_3] = 0,7$ мм
Температура резания $\Theta_0, 0^\circ\text{C}$ $\Theta_i = \Theta_0 + 200^\circ\text{C}$		900 920	720 740	845 865
Интенсивность износа резца $h_{03}, \frac{\text{мкм}}{10^3 \text{ см}^2}$	Θ_0	17	76	200
	Θ_k	21	83	220
Путь резания $l, \text{м}$	Θ_0	10000	4750	210
	Θ_k	7000	3800	192
$\Delta = \frac{h_{03} - h_{030}}{h_{030}} \cdot 100\%$		23	9,2	10
l_Θ / l_{Θ_0}		0,7	0,8	0,914
$E_0, \text{мВ при } \Theta_0$		13	22,3	32
$E_i, \text{мВ при } \Theta_0$		13,25	23,0	33,7
$\Delta E, \text{мВ, \% при } \Theta_0$		0,25 мВ; 1,9%	0,7 мВ; 3,14%	0,7 мВ; 2,19%
Глубина наклепа $h_i, \text{мкм}$	Θ_0	–	70	56,5
	Θ_i	–	73	72,5
Степень наклепа N	Θ_0	24,9	24,4	18,1
	Θ_i	–	24,9	25
$\Delta h_c, \text{мкм, \%}$		–	3 мкм; 11,2%	16 мкм; 28,3%

2. При большой разнице температур (термо-ЭДС) на контактных поверхностях, что характерно для черного точения (когда подача $S > 0,5$ мм/об), может наблюдаться существенный рост температур на контактных поверхностях инструмента с увеличением износа инструмента, хотя обработка ведется в режиме стабилизации средней температуры КИД.

В этом случае только при остром инструменте ($h_3 < 0,1$ мм) можно гарантировать эффективность управления с $\theta(E) = \text{const}$, когда эта термо-ЭДС практически отражает среднюю температуру по передней поверхности.

3. Поддержание температуры резания на уровне оптимальной ($\theta = \text{const}$) эффективно при небольшой разнице температур по контактным поверхностям ($\theta_1 / \theta_2 \rightarrow 1$), что характерно для точного и чистового точений.

Наличие контуров управления по температуре (термо-ЭДС) резания позволяет автоматически определять режимы обработки. Особенно эффективно применение САУ по температуре в гибких автоматизированных производствах,

мноغوноменклатурных производствах, при освоении новых обрабатываемых и инструментальных материалов [7, 8]. Возможность обеспечить при измерениях электропроводимости (ЭП) КИД постоянство оптимальной температуры резания ($E_0 = \text{const}$) позволила разработать датчики текущего износа инструмента, сил резания, отличающихся высокой точностью измерения, быстроедействием и инвариантностью к внешним условиям обработки [5].

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в УАИ и под руководством автора данной статьи в 70–80-х гг. XX в., позволили создать промышленные образцы регуляторов температуры резания (РТР), которые решением отраслевой комиссии Министерства авиационной промышленности СССР в августе 1985 г. были рекомендованы для широкого внедрения на предприятиях страны. Была выпущена установочная партия в 35 штук Ржевским ПО «Электромеханика». Всего внедрено на предприятиях страны более 50 систем автоматического управления по тем-

пературе резания в городах: Куйбышеве (1971, 1975 гг.), Уфе (1979, 1984, 1987 гг.), Калуге (1984 г.), Запорожье (1986, 1987 гг.), Москве (1986, 1987, 1988 гг.), Перми (1986, 1987 гг.).

Для технического использования РТР были разработаны в 1985 г. руководящие технические материалы по применению РТР [8]. В дальнейшем в УАИ-УГАТУ разработаны САУ процессом обработки деталей на металлорежущих станках в условиях гибких производств, адаптивные системы управления на базе CNC систем ЧПУ (рис. 2).

Нестационарность, стохастичность, много-связность, многорежимность, малый объем априорной информации процесса резания как управления обусловили необходимость построения многоуровневых (иерархических) систем.

На базе созданных датчиков текущей информации об основных параметрах процесса резания (ПР) (температуры и силы резания, износа инструмента) локальных САУ, современных быстродействующих ЭВМ и теоретических основ оптимизации ПР, базирующихся на положении об оптимальной температуре резания [1], в рамках созданной научной школы в УГАТУ разрабатывается многоуровневая (трехуровневая) система управления процессом резания (ПР).

На первом (нижнем) уровне производится управление непосредственно ПР с помощью локальной САУ.

Требуемые параметры режима резания определяются по моделям на втором уровне.

Выбор требуемого инструмента (его геометрии, марки материала), структуры и параметров САУ, критерия эффективности, алгоритма управления ПР осуществляется на третьем уровне.

САУ станком на 1-м уровне по определенному алгоритму управления и структуре обеспечивает ведение ПР по заданным критериям эффективности, анализируя выходные (контролируемые) параметры ПР (качество обработанной поверхности, износ инструмента, силы и температуры резания и др.),

Расчет режима обработки осуществляется на 2-м уровне по выработанным моделям. Модели ПР могут быть вида:

$$V_0 = f(S_g, S, t, r, \varphi, COЖ), E = f(V, S_g, S, t, r, \varphi),$$

$$P_z = f(S_g, S, t, r, \varphi, COЖ), R_z (или R_a) = f(V, S_g, S, t, r, \varphi),$$

$$p_3 = f(V, S_g, S, t, r, G).$$

По этим моделям определяется требуемая скорость $V_{\text{треб}}$ и $E_{\text{треб}}$. При этой скорости САУ станком ведет процесс обработки (точение, фрезерование), обеспечивая стабилизацию, например, $E = \text{const}$, с требуемой точностью.

Датчики информации (ДИ) выдают сигналы о текущем износе инструмента, температурах и силах резания, текущей глубине резания, о параметрах качества поверхностного слоя (КПС). Эти сигналы поступают в систему управления первого уровня и на более высокий уровень управления.

На 2-м уровне на основе текущей информации об износе инструмента, температуре и силах резания, параметрах КПС с помощью таблиц принятия решения могут вырабатываться сигналы на смену инструмента, перерасчет режимов обработки.

При обработке материалов по сигналам ДИ на 3-м уровне производится процесс обучения, определения структур и параметров САУ (идентификация) и критерия эффективности. При этом уточняется предварительно выбранная модель ПР. Для работы 3-го уровня в память машины должен быть заложен необходимый исходный материал (банк данных о станке, инструментах, обрабатываемом материале, пакет программ, обеспечивающий процесс оптимизации структуры САУ, комплект моделей ПР, которые можно принять за исходные на первом шаге управления).

При освоении современных информационных технологий (ИПИ-технологии), когда создают автоматизированные системы управления жизненным циклом изделий машиностроения, концепция иерархической системы управления ПР определяет задачу управления технологического процесса и построения основного нижнего уровня управления АСУ производства как первоочередную.



Адаптивная система управления (АдСУ) температурно-силовым режимом обработки выполнена на базе ЧПУ и состоит из программного обеспечения, входящего в состав СПО и датчиков регулируемых параметров. Предназначена для использования на станках токарной группы.

Цель создания системы – уменьшение возможности появления брака и повышение производительности обработки за счет адаптации к конкретным условиям обработки.

АдСУ поставляется в следующих вариантах:

1. АдСУ температурой резания

Служит для стабилизации температурного режима обработки. Управляет скоростью резания. Источником информации о температуре резания является естественная термопара «инструмент-деталь». Ориентирована на чистовую и получистовую виды обработки.

Достоинства:

- задание и контроль (стабилизация) температурного режима обработки;
- повышение стойкости режущего инструмента;
- улучшение качества поверхностного слоя;
- снижение вероятности появления температурных деформаций деталей;
- повышение производительности за счет адаптации режимов обработки к конкретным условиям (10–15%).

2. АдСУ силой резания

Предназначена для стабилизации силового режима обработки. Управляет контурной скоростью подачи. Источником информации о силе резания является датчик тока привода главного движения. Рекомендуются при черновых операциях.

Достоинства:

- повышение производительности обработки на 15–25%.
- снижение вероятности поломки режущего инструмента;
- диагностика аварийных ситуаций в зоне обработки;
- уменьшение степени наклепа обработанной поверхности детали.

Рис. 2. Адаптивная система управления на базе устройства ЧПУ типа CNC

ВЫВОДЫ

1. Разработанные САУ ПР на базе положения об оптимальной температуре резания являются основой обеспечения требуемых параметров качества обработанных поверхностей.

2. Автоматическое поддержание в процессе обработки резанием оптимальной температуры резания обуславливается созданием эффективных иерархических систем управления механообработывающим производством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров, А. Д.** Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1966. 264 с.

2. **Макаров, А. Д.** Автоматическое регулирование при торцовом и продольном точении процессов резания / А. Д. Макаров, В. Ц. Зориктуев // Резание и инструмент : сб. науч. тр. Харьковск. госуд. ун-та. Харьков, 1973. вып. 7. С. 5–11.

3. **Мухин, В. С.**, Остаточные напряжения и наклеп при торцовом точении / В. С. Мухин, В. Ц. Зориктуев // Вестник машиностроения. 1974. № 1. С. 60–63.

4. **Мухин, В. С.** Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД / В. С. Мухин. М.: Наука, 2005. 296 с.

5. **Зориктуев, В. Ц.** Электропроводимость контакта «инструмент-деталь» – физический и информационный параметр в станочных системах / В. Ц. Зориктуев, И. С. Хузин. М.: Машиностроение, 1996. 176 с.

6. **Зориктуев, В. Ц.** Температура на контактных поверхностях инструмента и средняя термо-ЭДС контакта «инструмент-деталь» / В. Ц. Зориктуев, Ш. Г. Исаев // Известия вузов. 1985. № 10. С. 146–151.

7. **Зориктуев, В. Ц.** Системы автоматического управления тепловым режимом обработок / В. Ц. Зориктуев, Ш. Г. Исаев, А. Д. Никин // Станки и инструмент. 1986. № 8. С. 10–12.

8. **Зориктуев, В. Ц.** Руководящие технические материалы, РТМ 1.4,1363-84: Управление качеством поверхностного слоя деталей при точении с применением регуляторов температуры резания / В. Ц. Зориктуев. М.: НИИД, 1985. 20 с.

ОБ АВТОРЕ

Зориктуев Вячеслав Цыденович, проф. каф. автоматизации технологическ. процессов. Д-р техн. наук по технологии машиностр., автоматизации технологии процессов и производств (Мосстанкин, 1990). Дипл. инж-механик (УАИ, 1963). Иссл. в обл. управления технологич. процессами.

