

УДК 621.91.02

**В. В. ПОСТНОВ, А. А. ШАФИКОВ****РАЗРАБОТКА ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ  
ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ**

Проведен анализ изменения состояния режущего инструмента с учетом технологической наследственности. Предложены эволюционная модель изнашивания режущего инструмента и система управления энергетическим состоянием зоны резания, позволяющая обеспечить заданный уровень интенсивности износа инструмента путем целенаправленного изменения механической и тепловой составляющих уравнения энергетического баланса. *Нестационарность резания; энергетический баланс; износ инструмента*

**ВВЕДЕНИЕ**

Применение современных станков с компьютерным управлением движением исполнительных органов позволяет существенно сократить вспомогательное время, в результате чего себестоимость и производительность механообработки в значительной степени определяются эффективностью процесса резания. Параметры процесса резания в процессе обработки меняются, поэтому возникает необходимость поддержания режимов резания на некотором оптимальном уровне. Эта задача может быть успешно решена путем применения адаптивных систем управления (АДСУ), позволяющих в процессе самоорганизации приспособляться к изменяющимся условиям обработки с целью получения наилучшей характеристики процесса резания. Термин «самоорганизующаяся система», как известно, был введен У. Р. Эшби в 1947 г. В настоящее время это понятие определяется как способность системы к стабилизации некоторых параметров посредством направленной упорядоченности своих структурных и функциональных отношений с целью противостоять энтропийным факторам среды. При этом необходимо знать физические закономерности самого управляемого процесса, чтобы обеспечить задачу синтеза системы управления. Кроме того, обеспечение надежности и эффективности процесса механообработки является невозможным без информации о текущем состоянии режущего инструмента. На сегодняшний день имеется ряд методов, позволяющих оценить со-

стояние режущего инструмента и его износ по косвенным параметрам [1]. При этом наибольшее распространение получили методы измерения интенсивности износа на основании анализа сигналов акустической эмиссии и виброакустических сигналов, электропроводимости контакта «инструмент – деталь», анализа постоянной и переменной составляющих термоЭДС, мощности привода главного движения, силы резания.

**1. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ,  
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ  
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

В реальных технологических процессах многообразие зависимостей входных и выходных параметров сводится к некоторой системе линейных дифференциальных уравнений, в которых в качестве входных переменных используют технологические параметры ( $v, S, t, \dots$ ) и их первые производные ( $a_v, a_s, a_t, \dots$ ).

Для системного анализа факторов, определяющих нестационарность процесса резания, предлагается их классификация на основе структурной схемы процесса резания как объекта управления. Входные параметры можно разделить на управляемые и неуправляемые. Выходные параметры являются результатом взаимодействия входных и внутренних параметров системы в процессе контактного взаимодействия в зоне обработки. Рассмотрение процесса резания как объекта управления позволяет разделить нестационарность на внешнюю, определяемую изменением во времени

выходных параметров, и внутреннюю, связанную с изменением физического состояния зоны контакта инструмента с деталью (рис. 1).

В качестве управляемых параметров можно выделить элементы режима резания ( $v, S, t$ ), геометрию ( $\alpha, \gamma, \varphi$ ) и конструктивные параметры режущего инструмента, а также скорости изменения технологических параметров ( $a_v, a_s, a_t, \dots$ ) во времени. К наблюдаемым (но неуправляемым) входным параметрам можно отнести изменения физико-механических параметров состояния заготовки и инструмента, форму обрабатываемой поверхности (торцевая, коническая, винтовая). К ненаблюдаемым — колебания глубины резания  $\Delta t(\tau)$ , связанные с изменением припуска на обработку в связи с погрешностями формы заготовки, а также возможные изменения скорости  $\Delta v(\tau)$ , толщины среза  $\Delta a(\tau)$ , геометрии  $\Delta \Gamma(\tau)$ , инструмента, связанные с погрешностью установки и параметрами жесткости  $j(\tau)$  технологической системы.

Внутреннюю нестационарность процесса резания условно можно разделить на необратимую, связанную с износом инструмента  $h(\tau)$ , изменениями в структурно-фазовом и прочностном состоянии приконтактных слоев режущей части инструмента и заготовки, и обратимую, в основном периодически повторяющуюся, связанную с особенностями протекания контактных процессов в зоне обработки: закономерно-периодическими падениями напряжений на границах поверхностей сдвигов, изменением формы и положения зоны сдвига, явлениями образования и срыва нароста и т. д.

К области выходных параметров процесса резания можно отнести подмножество технологических параметров, таких как производительность, надежность, экономичность обработки в пределах, обеспечивающих требуемые характеристики качества обработанных поверхностей и точности изготовления детали. Кроме этого, в качестве самостоятельных контролируемых выходных параметров процесса резания рассматриваются температура  $\theta$  или термоЭДС резания  $E$ , сила резания  $P_z$ , амплитудно-частотные характеристики, размерная стойкость инструмента ( $J_h, h_{\text{оп}}, l, T$  и т. д.), образующие подмножество ( $\Phi\tau$ ) физических выходных параметров. Следует отметить, что комплекс параметров ( $\Phi\tau$ ) в конечном счете, в зависимости от вида целевой функции, критериев оптимизации и накладываемых ограничений, определяет комплекс  $T(\tau)$  технологических выходных пара-

метров процесса резания как операции технологического процесса [1].

## 2. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ

Состояние термодинамической системы, которой в общем случае является зона контакта инструмента с обрабатываемой деталью, может быть задано с помощью ряда параметров: действующих касательных  $\tau_p$  и нормальных  $\sigma_p$  напряжений, фактической площади  $A_r$  контакта, температуры  $\theta$  и т. д. [2]. Состояние, в котором параметры этой системы различны в разные моменты времени или в разных точках (координатах), называется неравновесным. Для таких состояний характерны градиенты макроскопических параметров ( $\theta, \sigma, A_r$  и т. д.). Все реальные процессы в зоне фрикционного контакта являются неравновесными, поскольку протекают со скоростями, большими скорости релаксации  $v_{ri}$ , и лишь в определенных температурно-скоростных условиях могут приближаться к равновесным.

Традиционная запись энергетического баланса процесса механической обработки металлов в интегральной форме

$$W_p = Q_p + AU \quad (1)$$

не учитывает непрерывный параллельно-последовательный переход затраченной энергии резания  $W_p$  в тепловую  $Q_p$  и другие виды энергии  $\Delta U_i$ . В связи с этим он не может служить основой для понимания (анализа) общих закономерностей динамики реализации данных процессов и возможных путей их оптимизации для решения технических задач. Тепловые явления при резании материалов являются следствием физических закономерностей протекания процессов упруго-пластического деформирования, трения и разрушения в зоне структуро- и формообразования, которые согласно современным представлениям [2] имеют неравновесный динамический характер энергетических превращений.

Такой необратимый динамичный процесс, как резание, при переменных во времени условиях нагружения целесообразно описывать, используя принципы термодинамики неравновесных процессов [3] с помощью так называемых диссипативных функций  $\frac{du_i}{d\tau}$  энергии, затрачиваемой на какой-либо процесс (например, пластическое течение обра-

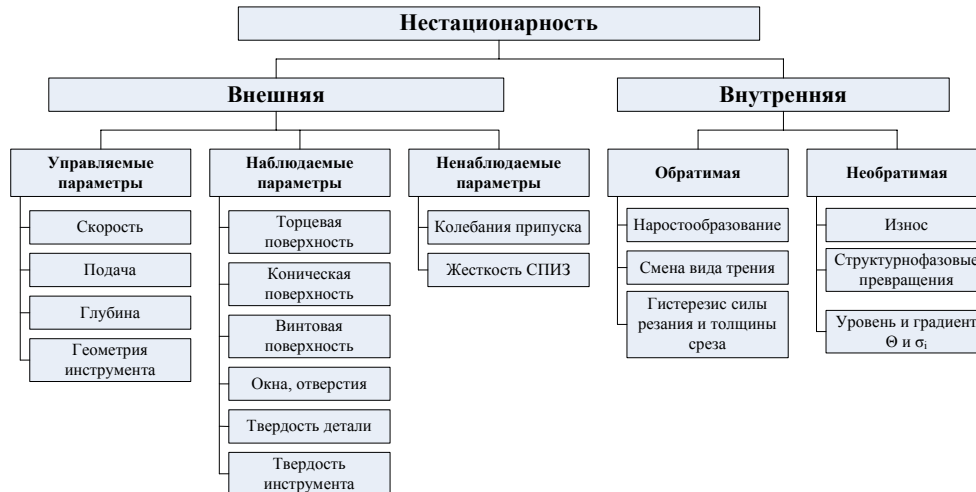


Рис. 1. Классификация видов нестационарности процесса резания

батываемого материала) и отнесенной к единице фактической площади  $A_r$  контакта.

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{A_2} \frac{du_1}{d\tau} = \theta \frac{d\bar{s}_i}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – температура контакта, К;

$\frac{d\bar{s}_i}{d\tau} = \frac{1}{A_r} \cdot \frac{ds_i}{d\tau}$  – удельная скорость изменения энтропии  $S_i$  системы.

Диссипативную функцию можно также определить как произведение термодинамической (обобщенной) силы  $(-\Delta\sigma_i)$  и обобщенного потока  $J_i$

$$\bar{\Psi}_i = J_i (-\Delta\sigma_i). \quad (3)$$

Представление о диссипативных структурах как открытых системах, формирующихся в процессе обмена веществом и энергией с окружающей средой, введено Г. Николисом и И. Пригожиным [4]. Движущей силой явления самоорганизации диссипативных структур является стремление открытых систем при нестационарных процессах к снижению производства энтропии. 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.

Большинство экспериментальных работ [3, 5, 6] показывают, что механическая внешняя энергия  $\Delta W_p$ , подведенная к зоне контакта реза с деталью, затрачивается на энергию деформации  $\Delta W_d$  обрабатываемого материала в зонах стружкообразования и трения по передней и задней поверхностям инструмента, а также на изменение внутренней энергии  $\Delta U_i$  контактирующих материалов.

Энергия деформации  $\Delta W_d$  трансформируется затем в тепловую энергию  $Q$ , рассеиваясь в стружку, деталь, резец и окружающую среду. Изменение внутренней энергии  $\Delta U_i$  в зоне фрикционного контакта в основном складывается из энергии диспергирования и формоизменения  $\Delta U_F$  изнашиваемого инструмента, а также из энергии  $\Delta U_C$ , накопленной в поверхностном слое обрабатываемого материала [6], энергии структурно-фазовых превращений  $\Delta U_S$  и т. д.

К сожалению, в настоящее время не существует точных аналитических выражений, которые описывали бы все перечисленные процессы диссипации энергии. Кроме того, согласно данным [3, 6], такие составляющие, как  $\Delta U_C$ ,  $\Delta U_S$  не превышают 1% от затраченной энергии  $W_p$ .

Таким образом, 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:

$$\frac{1}{A_{rp}} \frac{dW_p}{d\tau} = \frac{1}{A_{rd}} \frac{dW_d}{d\tau} + \frac{1}{A_{rF}} \frac{dW_F}{d\tau}. \quad (4)$$

Используя закономерности теории резания, кинетической теории прочности и пластичности, механохимии и физической кинетики, можно конкретизировать основные составляющие уравнения баланса ДФ и записать уравнение общего энергетического ба-

ланса

$$\begin{aligned} \frac{1}{b(h_3 + c)} \left( l \frac{dP_z}{d\tau} + P_z v \right) = \\ = \frac{n'}{D} \cdot 10^5 \rho c \Delta\theta_m (1 - m) h_\theta \varepsilon' + \\ + N \left[ \frac{3(1 + \mu) \sigma_{-\eta}^2}{4E} \right] \frac{dh_3}{d\tau}, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $b$  — ширина срезаемого слоя;  $h_3$  и  $c$  — длины контакта резца со стружкой и деталью по задней и передней поверхностям инструмента;  $l$  — путь резания;  $P_z$  — сила резания,  $v$  — скорость резания;  $\rho$ ,  $c$  — соответственно плотность и удельная теплоемкость материала детали;  $h_\theta$  — толщина термомпластически деформированного слоя материала детали;  $\Delta\theta_m$  — приращение модифицированной температуры;  $m$  — коэффициент температурно-скоростного упрочнения материала детали в контактной зоне;  $n'$  — константа, связанная с длиной свободного пробега дислокации;  $D$  — число дислокаций, приходящихся на единицу степени пластической деформации;  $\varepsilon'$  — скорость деформации;  $N$  — число воздействий, приводящих к отделению частицы износа;  $\mu$  и  $E$  — коэффициент Пуассона и модуль упругости инструментального материала;  $\sigma_{-\eta}$  — напряжение, обеспечивающее локальные сдвиги в объеме деформируемого слоя.

Уравнение (5) связывает текущее значение износа  $h_3$  и скорость его изменения  $\frac{dh_3}{d\tau}$  с величиной и скоростью изменения силы резания  $P_z$ , приращением  $\Delta\theta_m$  температуры, а также элементами режима обработки, которые являются управляющими параметрами.

Известны [1] методы и системы управления температурными и силовыми координатами процесса резания с целью обеспечения размерной точности обработки и стойкости инструмента.

Таким образом, появляется принципиальная 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. Уравнение (5) является эволюционной моделью изнашивания режущего инструмента, поскольку связывает зависимость скорости изменения фаски износа с ее текущим значением  $h_3$ , как в явном виде, так и косвенно через значения приращения силы  $P_z$  и температуры  $\Delta\theta$  резания.

### 3. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

Сложность и недостаточная изученность физических процессов, происходящих в зоне обработки с учетом многообразия выходных параметров и факторов влияния на них, не позволяют на сегодняшний день построить замкнутую количественную модель процесса взаимодействия инструмента и заготовки. Однако настоятельная потребность разработки управляемых технологий резания обуславливает необходимость создания феноменологических моделей, отражающих основные закономерности протекающих в зоне резания энергетических процессов и их влияние на выходные параметры обработки, в том числе — на износ режущего инструмента.

Одним из фундаментальных понятий механики разрушения является понятие о некоторой безразмерной функции поврежденности (ФП), физически связанной с процессами накопления и взаимодействия дефектов в твердом теле и численно равной отношению дефектной части материала к его исходному состоянию. При достижении критического значения функции поврежденности происходит полная потеря несущей способности материала. Очевидно, что ФП является функцией физических свойств материала анализируемого элемента технологической системы и условий воздействия на него.

Общее соотношение, описывающее изменение поврежденности  $h_i(\tau)$  материала в процессе его эксплуатации, представляется в виде

$$h_{кр} \geq h_i(\tau) = h_T + \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} J(U_i, \tau) d\tau, \quad (6)$$

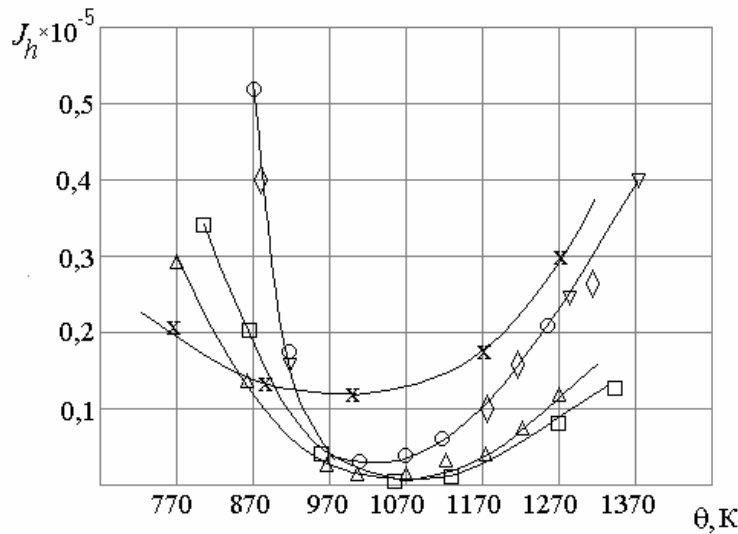
где  $h_{кр}$  — критическое значение поврежденности;

$h_T$  — значение накопленной (текущей) поврежденности;

$J(U_i, \tau)$  — интенсивность изменения поврежденности в момент времени  $\tau$ , зависящая от совокупности энергетических факторов  $U_i$  воздействия на материал ( $Q$ , механическая нагрузка, физико-химические свойства).

В общем случае, возможно, имеет место зависимость

$$U_i = f\left(h; \frac{dh}{d\tau}; \frac{d^2h}{d\tau^2}; \dots\right), \quad (7)$$



**Рис. 2.** Сопоставление расчетных и экспериментальной температурных зависимостей интенсивности износа реза ВК8 при точении сплава ХН73МБТЮ ( $S = 0,11$  мм/об,  $t = 0,5$  мм):  $\circ - h_3 = 0$ ;  $\Delta - h_3 = 0,2$  мм;  $\square - h_3 = 0,35$  мм;  $\diamond - h_3 = 0,5$  мм;  $\nabla - h_3 = 0,6$  мм

из которой следует, что величина энергетического воздействия на материал зависит от его поврежденности (принцип технологической наследственности, приспособляемости и изменчивости) и соотношение (6) представляет собой интегро-дифференциальное уравнение, а в общем случае — систему уравнений. С физической точки зрения уравнения (6) и (7) феноменологически описывают процесс накопления дефектов в материале при различных видах нагружения, в том числе — нестационарном, а его общий характер позволяет использовать соотношение (6) при решении широкого круга практических задач управления состоянием деформируемого материала.

Таким образом, использование соотношения (6) в сочетании со структурно-энергетическим анализом контактных процессов создает методические предпосылки для управления и диагностирования поврежденности посредством регистрации компонент энергетического баланса процесса обработки. Однако ключевым вопросом построения обобщенной феноменологической модели, отражающей данные закономерности, является использование математических соотношений, определяющих вид зависимости  $J(U_i, \tau)$ .

Для изнашиваемой задней поверхности инструмента уравнение общего энергетического баланса (6) можно записать в виде

$$\frac{1}{bh_3} \frac{d}{d\tau}(F_3 l) = \frac{h'}{D} \cdot 10^6 \frac{\lambda \rho c}{\tau_p} \left( \frac{1-m}{m} \right) \times$$

$$\times \frac{h_\theta}{h_d} \frac{f_\theta \cdot B \cos \alpha}{\left(2 - \frac{\Delta}{h_3}\right)} v \Delta \theta_3 + J_h \text{ИФ} N_{\Pi}, \quad (8)$$

откуда

$$J_h = \frac{1}{\text{ИФ} N_{\Pi}} \left[ \frac{\frac{d}{d\tau}(F_3 l)}{bh_3} - \frac{h'}{D} \cdot 10^6 \frac{\lambda \rho c}{\tau} \left( \frac{1-m}{m} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{h_\theta}{h_d} \cdot \frac{f_\theta \cdot B \cos \alpha}{\left(2 - \frac{\Delta}{h_3}\right)} v \Delta \theta_3 \right]. \quad (9)$$

Результаты расчета зависимостей  $J_h(\theta)$  по уравнению (9) в сравнении с экспериментально полученными значениями показывают (рис. 2) не только качественную, но и достаточно хорошую количественную сходимость, что позволяет сделать заключение об адекватности термодинамической модели реальным условиям резания.

Поскольку  $J_h = dh_3/dl$ ,  $F_3 = q'_F \cdot bh_3$ , а  $\rho c \times \Delta \theta = \Delta H_T$  — изменение теплосодержания приконтактных слоев обрабатываемого материала, для случая обработки с постоянными значениями  $S$  и  $t$  выражение (9) можно записать относительно приращения фаски износа

$$\Delta h_3 = \int_{l_0}^{l_i} \frac{q'_F}{\text{ИФ} N_{\Pi}} dl - \int_{\tau_0}^{\tau_i} C_d \frac{\Delta H_T}{\text{ИФ} N_{\Pi}} d\tau, \quad (10)$$

т.е. приращение износа является разностью функционалов силовой и температурной нагруженности изнашиваемой поверхности,

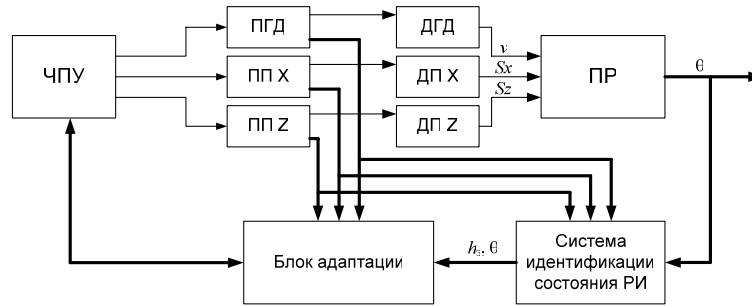


Рис. 3. Система управления энергетическим состоянием зоны резания

причем влияние силовой нагрузки ( $q'_F$ ) определяется приращением пути резания, а температура, способствующая увеличению теплоемкости  $\Delta H_T$  и разупрочнению инструментального материала, влияет на износ инструмента с учетом времени ее воздействия. Очевидно, что приращение износа будет минимальным в случае сближения численных значений указанных функционалов.

Для определения минимума  $J_h$  и приращения  $\Delta h_3$  по зависимостям (8 и 10) существует ряд способов, основанных на методах вариационного исчисления [7], заключающихся в замене переменных правой части на частные зависимости от единой общей переменной или их представлении в виде системы линейных уравнений, решаемых относительно текущих значений интенсивности износа. Во всех этих случаях решение весьма трудоемко и конечное выражение может быть крайне сложным и носящим частный характер.

Вместе с тем, с достаточной точностью условия минимизации уравнения (9) могут быть получены из условий максимальной синхронизации механических и тепловых процессов в определенном оптимальном температурном диапазоне [3].

Для проведения экспериментальной проверки полученных зависимостей была создана система управления энергетическим состоянием зоны резания на базе токарного станка с ЧПУ, структурная схема которой приведена на рис. 3.

Во время обработки система идентификации состояния РИ, получая информацию о текущих значениях параметров обработки (скорость резания, подача, мощность привода главного движения (ПГД) и приводов подачи (ППХ, ППZ), температура (термоЭДС) и др.), оценивает текущее значение фаски износа инструмента  $h_3$  и передает его в блок адаптации. Блок адаптации, интерпретируя программу обработки, полученную от ЧПУ, определяет длину последующего перехода (длину резания  $l$ ). Затем, по приведенным выше за-

висимостям, на основании информации о текущих значениях износа РИ и температурно-силовых параметров, рассчитывает параметры обработки ( $v, S, a_v, a_s$  и т. д.) в зависимости от выбранного режима работы системы:

1) *поддержание минимальной интенсивности износа инструмента.* В этом случае обеспечивается равенство функционалов (10) силовой и температурной нагруженности зоны резания;

2) *поддержание заданного значения интенсивности износа при обеспечении режима максимальной производительности обработки.* В этом случае параметры обработки (переменное значение скорости и определенная величина ускорения резания) рассчитываются исходя из заданного значения фаски износа  $\Delta h_i$ , обеспечивающего требуемую интенсивность износа на отрезке  $dl$  за время  $d\tau$  (10).

Результаты экспериментов, выполненных при различных вариантах режима работы системы управления, приведенные на рис. 4, показывают, что в случае управляемой вариации скорости резания ( $v_{нач} = v_0$ ), обеспечивающей сохранение термодинамического равновесия зоны резания, может быть повышена стойкость инструмента  $T$  почти в 2 раза, или в 1,5–1,8 раза повышена производительность обработки (средняя скорость резания или  $t_{маш}$ ) при сохранении периода стойкости (режим  $v_{нач} > v_0$ ) по сравнению с течением в режиме постоянства оптимальной скорости резания ( $v_0 = \text{const}$ ).

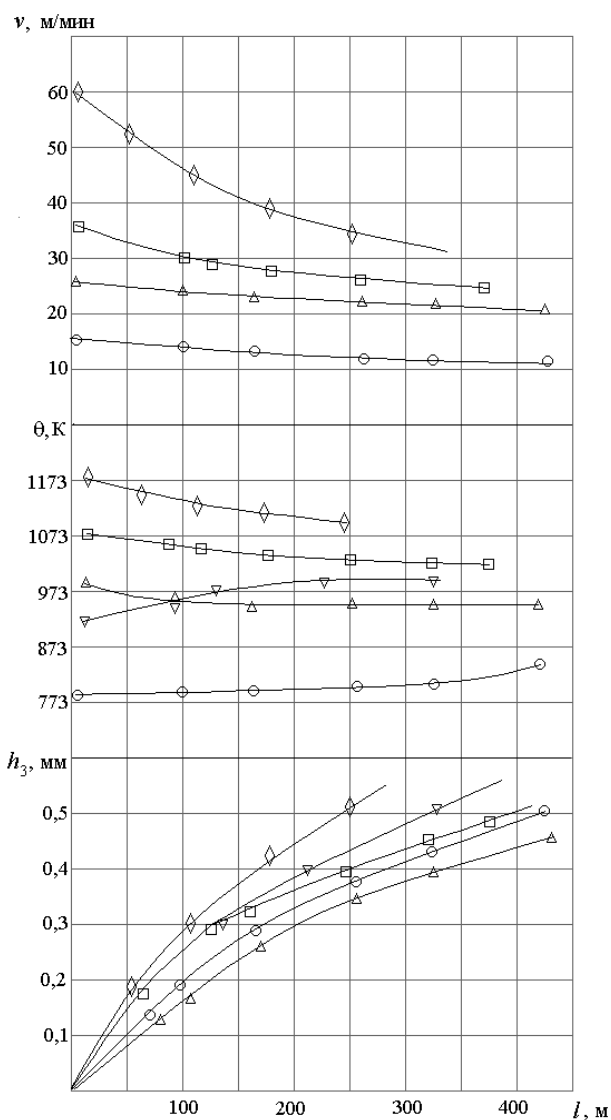


Рис. 4. ХН73МБТЮ-ВД-ВК60М:  $S = 0,12$  мм/об,  $t = 0,75$  мм  $\nabla - v_0 = \text{const}$ ;  $\circ - v_{\text{нач}} < v_0$ ;  $\Delta - v_{\text{нач}} = v_0$ ;  $\square, \diamond - v_{\text{нач}} > v_0$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований получена эволюционная модель изнашивания режущего инструмента, связывающая интенсивность износа РИ с величиной фаски износа.

2. Предложена структура системы управления процессом резания, включающая в себя эволюционную модель изнашивания режущего инструмента и позволяющая обеспечить заданный уровень интенсивности износа инструмента путем целенаправленного изменения механической и тепловой составляющих уравнения энергетического баланса.

3. Реализация системы управления показала преимущество обработки при условии максимальной синхронизации механических

и тепловых процессов за счет варьирования скорости и ускорения резания по сравнению с режимом постоянства оптимальной скорости резания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зориктуев, В. Ц.** Диагностика состояния режущего инструмента в автоматизированном производстве : учеб. пособие / В. Ц. Зориктуев, Р. Р. Латыпов, В. В. Постнов, А. Д. Никин. Уфа : УГАТУ, 1994. 58 с.
2. **Хаазе, Р.** Термодинамика необратимых процессов / Р. Хаазе. М. : Мир, 1967. 253 с.
3. **Постнов, В. В.** Динамика износа контактных поверхностей режущего инструмента / В. В. Постнов // Оптимальное управление мехатронными станочными системами : сб. науч. трудов. Ч. 2. Уфа : УГАТУ, 1999. С. 17–23.
4. **Николис, Г.** Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. М. : Мир, 1977. 512 с.
5. **Кабалдин, Ю. М.** О причинах немонотонности зависимостей стойкости и износа инструмента от скорости резания / Ю. М. Кабалдин // Вестник машиностроения. 1997. № 7. С. 31–37.
6. **Старков, В. К.** Дислокационные представления о резании металлов / В. К. Старков. М. : Машиностроение, 1979. 160 с.
7. **Попков, Ю. С.** Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю. С. Попков, О. Н. Киселев, Н. П. Петров, Б. Л. Шмультян. М. : Энергия, 1976. 440 с.

### ОБ АВТОРАХ



**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.



**Шафиков Альберт Анисович**, зав. лаб., асп. каф. мехатрон. станоч. систем. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2005). Готовит диссертацию в области оптимального управления процессами механообработки.