



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов

Вилор Заковоротный^a, Валерия Гвинджилия^{b,*}

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 14 августа 2020
 Рецензирование: 28 августа 2020
 Принята к печати: 17 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Эффективность резания
 Нелинейная динамика
 Самоорганизация
 Интенсивность изнашивания инструмента
 Технологические режимы

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ: «Разработка теории анализа и синтеза управляемой самоорганизации в динамической системе резания в ходе обработки на примере изготовления деталей на токарных станках», № 19-08-00022; «Разработка методов анализа и синтеза динамической системы резания по критерию минимизации приведенных затрат на изготовление», № 20-38-90074.

АННОТАЦИЯ

Введение. Интенсивность изнашивания инструмента как приращение износа к пути резания характеризует один из важных показателей обработки. Он используется при разработке алгоритмов управления процессом резания, в том числе при расчете траекторий для станков с ЧПУ. По мере увеличения скорости резания достигается ее значение, при котором интенсивность изнашивания минимальна. Ей соответствует оптимальное значение производства тепла в зоне резания, то есть мощности необратимых преобразований подводимой к резанию энергии. Производство тепла зависит от изменяющихся вдоль траектории инструмента параметров динамической системы. В связи с этим на начальном этапе и в процессе обработки необходимо выполнять согласование управления со свойствами динамической системы резания. **Предмет.** В статье приводится исследование и анализ взаимосвязи интенсивности изнашивания инструмента с динамическими свойствами процесса резания, исходя из этого предлагается определение технологических режимов, при которых интенсивность изнашивания минимальна. **Цель работы** заключается в изучении зависимости интенсивности изнашивания инструментов от динамических свойств обработки, исходных и изменяющихся вдоль пути, и создания на этой основе методов согласования технологических режимов с текущей динамикой резания для уменьшения интенсивности изнашивания. **Метод и методология проведения работы.** В работе экспериментально-аналитическими методами выполнены исследования эволюционных изменений свойств системы во взаимосвязи с развитием износа инструмента. Приводятся разработанные математические модели системы резания, отличающиеся от известных тем, что дополнительно моделируется мощность необратимых преобразований энергии механической системы в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. Приводятся зависимости скорости изнашивания от мощности необратимых преобразований, т. е. на заданном временном интервале в приращение износа. Тем самым учитывается зависимость изнашивания от динамических свойств системы резания, в том числе в ходе ее эволюции. **Результаты и обсуждения.** Показано, что свойства эволюции являются чувствительными к малым вариациям параметров динамической системы. Эти вариации вносят существенные изменения в интенсивность изнашивания. В работе раскрывается зависимость изнашивания от свойств динамической системы, т. е. от ее параметров, технологических режимов, биений и других возмущений. **Выводы.** Раскрытие зависимости износостойкости от динамических свойств процесса резания характеризует новые представления о факторах, влияющих на износостойкость.

Для цитирования: Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 54–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Энвериевна, аспирант
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: +7 (918) 583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

Введение

Изнашивание режущих инструментов является одним из основных параметров обработки. В дальнейшем под термином «интенсивность изнашивания» понимается приращение износа по задней грани w инструмента к приращению пути l резания $v_w^{(l)} = dw / dl$, в отличие от ско-

рости изнашивания как приращения износа ко времени $v_w = dw / dt$. При развитии износа изменяются основные характеристики обработки, в том числе показатели качества деталей. Поэтому изучение влияния условий обработки, свойств инструментальных материалов, смазочно-охлаждающей среды, технологических режимов, геометрии инструмента, вибраций и прочего на изнашивание являлось предметом многочисленных исследований [1–5].

При изучении изнашивания большое внимание уделяется теплофизике, в том числе неравновесной нелинейной термодинамике необратимых процессов [1, 2, 6–18]. Показано, что по мере увеличения мощности необратимых преобразований в контактирующих поверхностях образуются диссипативные структуры [6–9]. В их формировании участвуют все элементы системной физики: механические взаимодействия, нелинейная термодинамика, процессы адсорбции, адгезии, диффузии, трибохимии и пр. [10–19]. Этот физически системный подход сформировал синергетическую парадигму методов, направленных на повышение эффективности резания и трения [19, 20].

При оптимизации особое место занимает скорость резания, которая наряду с силами существенно влияет на мощность необратимых преобразований энергии в зоне резания, являющаяся первичным источником всех отмеченных физических явлений. Доказано, что при увеличении скорости достигается ее оптимальное значение, при котором изнашиваемость минимальна. При этом наблюдается переход от адгезионного к диффузионному изнашиванию. Ему соответствует определенная мощность необратимых преобразований энергии, которая при резании может оцениваться температурой. Поэтому выдвинуты гипотезы о существовании оптимальной температуры, при которой изнашиваемость минимальна [21–23]. Также предложены энтропийные и энергетические критерии [1, 2, 8–16].

Показано, что изнашивание зависит не только от мощности, но и от ее предыстории. Исходя из этого предложены математические модели на основе уравнений Вольтерры относительно траектории мощности необратимых преобразований энергии по работе [19, 23, 45]. Как правило, в моделях рассматривается суммарная мощность,

а не ее часть в сопряжении задних граней с заготовкой. Эта мощность зависит от динамических свойств системы. Ее математические модели учитывают подсистемы со стороны инструмента и заготовки, которые взаимодействуют через динамическую связь, формируемую резанием. Учитывается запаздывание сил по отношению к вариациям площади среза, зависимость сил от скорости, регенерация следа [24–36], а также параметрическое самовозбуждение [38]. Изучены проблемы устойчивости, притягивающие множества деформаций, их бифуркации [37–42]. Исследования подчинены раскрытию влияния динамики на выходные характеристики резания [43, 44].

Следующим шагом, диктуемым практикой, является обеспечение технологических режимов и соответствующих им траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС), адаптированных к изменяющимся динамическим свойствам резания (ДСР). В связи с этим в **работе формируется цель** повышения эффективности процессов обработки на станках на основе согласования ТИЭС с эволюционно изменяющимися ДСР, при которых интенсивность изнашивания инструмента минимальна. Для достижения указанной цели выполнено математическое моделирование ДСР, отличающееся от известного тем, что главное внимание уделено моделированию мощности необратимых преобразований в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. На основе математического моделирования доказана подтвержденная практикой эффективность согласования ТИЭС с эволюционной перестройкой ДСР.

Методика исследований

Динамическая система резания

В исследовании используется системно-синергетический подход, согласно которому резание анализируется не изолированно, а как часть единой взаимосвязанной системы [1, 19, 48], состоящей из подсистем, обеспечивающих ТИЭС, подсистемы упругих деформаций и сил, а также подсистем, формирующих неуправляемые внешние возмущения. Система должна обладать эволюционными свойствами, и фактором, вызывающим эволюционные изменения, должна быть

фазовая траектория мощности необратимых преобразований энергии в зоне резания по произведенной работе. При анализе управляемой ДСР используется принцип разделения движений [19, 45, 46], приводящий к анализу динамики в подвижных координатах, задаваемых ТИЭС. Состояние этих подсистем характеризуется своими векторами, которые объединяются в ДСР с помощью связей между ними. Перечислим координаты и воздействия, характеризующие систему, и выясним факторы, их объединяющие.

1. ТИЭС: $\mathbf{I} = \{X, Z, C\}^T \in \mathfrak{R}_1^{(3)}$ и $\mathbf{V}^{(1)} = \{V_1^{(1)} = dX/dt, V_2^{(1)} = dZ/dt, V_3^{(1)} = dC/dt\}^T \in \mathfrak{R}_{V(0)}^{(3)}$ (рис. 1). Для токарного станка это траектории

поперечного $X(t)$, продольного $Z(t)$ суппортов и поворота шпинделя $C(t)$. Производные $dI/dt = \mathbf{V}^{(1)}$ – это их скорости. Здесь очевидна связь $V_3^{(1)}(t) = \pi D \Omega(t)$. Рассматривается циклическая частота Ω . Если скорости представлены в функциях перемещения, то они представляют собой фазовые траектории. Например, траектория скорости продольного суппорта $V_2(Z)$ по оси Z – это желаемая фазовая траектория продольного суппорта.

2. Механические части приводов неидеальны, и они вносят погрешности $\Delta(\mathbf{t}) = \{\Delta_1(t), \Delta_2(t), \Delta_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_1^{(3)}$, зависящие от

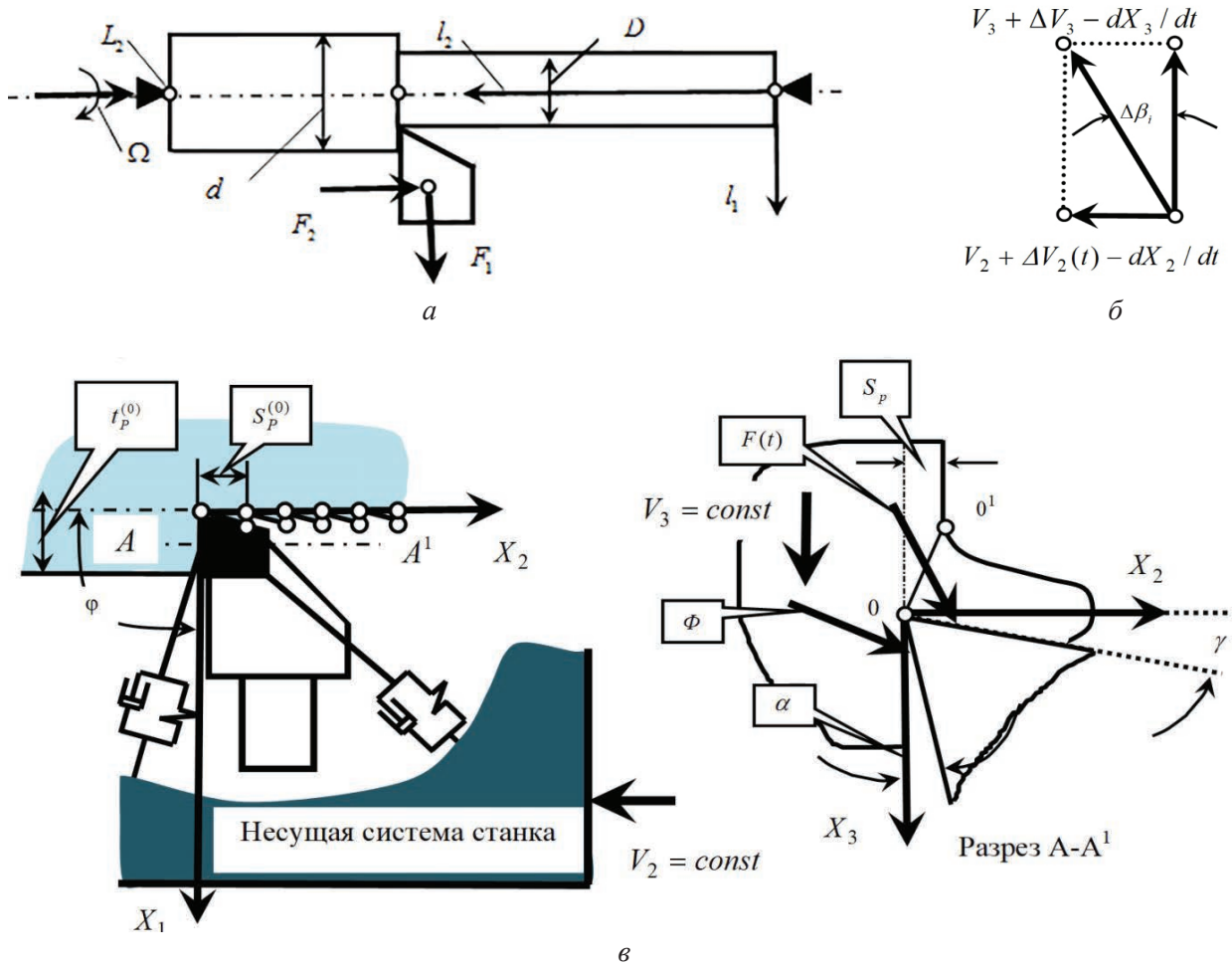


Рис. 1. Схема динамической системы:

a – схема перемещений в пространстве $\mathfrak{R}_1^{(3)}$; *б, в* – ориентация сил резания и деформационных смещений

Fig. 1. Scheme of dynamic system:

a – scheme of displacement in space $\mathfrak{R}_1^{(3)}$; *б, в* – orientation of cutting force and deformational displacement

точности станка и его состояния. Это биения шпинделя, кинематические возмущения и пр. По своей структуре $\Delta(\mathbf{t})$ есть априорно заданные периодические функции времени. Таким образом,

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= \{L_1(t), L_2(t), L_3(t)\}^T = \\ &= \{l_1(t), l_2(t), l_3(t)\}^T + \\ &+ \{\Delta_1(t), \Delta_2(t), \Delta_3(t)\}^T. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь \mathbf{L} – вектор ТИЭС с учетом неуправляемых возмущений. На векторы \mathbf{l} и \mathbf{L} наложены ограничения $\mathbf{l} \subset \mathfrak{R}_D$ и $\mathbf{L} \subset \mathfrak{R}_D$, диктуемые кинематикой, требованиями к шероховатости ($V_2^{(l)}(t) / V_3^{(l)}(t) \leq \delta$) и возможностью систем управления. Здесь \mathfrak{R}_D – это множество допустимых вариаций ТИЭС.

3. Заданные в пределах полосы пропускания серводвигателей станка, траектории \mathbf{l} характеризуют подвижную систему координат, в которой анализируются упругие деформации $\mathbf{x} = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ вершины инструмента относительно несущей системы станка. Не нарушая общности, ограничимся случаем продольного течения абсолютно жесткой детали. Следуя [19], имеем

$$\mathbf{m} \frac{d^2 X}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{dX}{dt} + \mathbf{c} X = \mathbf{F}_\Sigma, \quad (2)$$

где $\mathbf{m} = [m_{s,k}]$, $m_{s,k} = m$, при $s = k$, $m_{s,k} = 0$, при $s \neq k$, $k = 1, 2, 3$ (кгс²/мм), $\mathbf{h} = [h_{s,k}]$ (кгс/мм), $\mathbf{c} = [c_{s,k}]$, $s, k = 1, 2, 3$ (кгс/мм) – симметричные, положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $\mathbf{F}_\Sigma = \{F_{\Sigma,1}, F_{\Sigma,2}, F_{\Sigma,3}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – вектор сил, действующих на инструмент.

4. Если следовать синергетической концепции анализа, то силы \mathbf{F}_Σ необходимо представить в координатах состояния и внешних воздействиях. Поэтому представим силы \mathbf{F}_Σ в виде суммы $\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F} + \Phi$ сил $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$, дей-

ствующих на переднюю грань инструмента, и $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – на задние его грани.

Такое представление обусловлено тем, что в дальнейшем нам необходимо анализировать износ инструмента по задней грани. Для этого нужно знать мощность необратимых преобразований энергии в области сопряжения задних граней с заготовкой. Вначале рассмотрим силы \mathbf{F} . Для моделирования их в координатах состояния и внешних воздействиях примем гипотезы [24–42]:

1) $Mod[\mathbf{F}]$ зависит от площади срезаемого слоя S ;

2) коэффициент пропорциональности между $Mod[\mathbf{F}]$ и площадью S уменьшается при увеличении скорости резания;

3) учтем запаздывание $Mod[\mathbf{F}]$ по отношению к вариациям S . Ограничимся преобразованием в виде апериодического звена с постоянной времени T_0 ;

4) ориентация сил в пространстве при малых вариациях \mathbf{X} представима угловыми коэффициентами, т. е. $\mathbf{F}(\mathbf{t}) = F_0(t) \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$, $F_0(t) = Mod = Mod[\mathbf{F}]$. Угловые коэффициенты $\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ удовлетворяют условиям нормировки. Тогда

$$\begin{aligned} T_0 dF_0 / dt + F_0 &= \\ &= \rho \{1 + \mu \exp[-\alpha(V_3 + d\Delta_3 / t - dX_3 / dt)]\} \times \\ &\quad \times t_P(t) S_P(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где T_0 – постоянная времени (с); ρ – давление в области малых скоростей (кгс/мм²); μ – безразмерный коэффициент; α – коэффициент, определяющий убывание сил при увеличении скорости. Технологические режимы, глубина резания $t_P(t)$, величина подачи $S_P(t)$ и скорость резания $V_3(t)$ связаны с ТИЭС, неуправляемыми возмущениями и деформациями следующими соотношениями:

$$\begin{cases} t_P(t) = t_P^{(0)} + \Delta_1(t) - x_1; \\ S_P(t) = \int_{t-T}^t \{V_2^{(0)}(\xi) + d\Delta_2(t) / dt - v_2(\xi)\} d\xi; \\ V_3(t) = \pi D \Omega + d\Delta_3(t) / dt - dx_3 / dt, \end{cases} \quad (4)$$

где $T = \Omega^{-1}$ – время оборота детали; $V_2^{(0)}$ – скорость подачи суппорта; $t_p^{(0)}$ – глубина резания без учета деформаций и возмущений. Соотношения (4) фактически определяют связь между введенными ранее векторами и объединяют подсистемы в единую ДСР. Параметр T_0 может быть выражен через технологические режимы с учетом деформационных смещений и неуправляемых возмущений

$$T_0(S_p, t_p, V_3) = \frac{\kappa \zeta_c S_p(t) t_p(t)}{V_3(t)}, \quad (5)$$

где κ – коэффициент (мм^{-1}); ζ_c – коэффициент усадки стружки.

Силы Φ , действующие на заднюю главную и вспомогательную грани инструмента, пропорционально возрастают по мере сближения грани инструмента с заготовкой. Сближение определяется изменением углов между задними гранями (главной $\beta_{\Sigma,2}(t)$ и вспомогательной $\beta_{\Sigma,1}(t)$) и направлением скорости. Текущее значение заднего угла $\beta_{\Sigma,i}(t)$, $i = 1, 2$ (рис. 1, б) определяется суммой

$$\beta_{\Sigma,i}(t) = \beta_i - \Delta\beta_i(t), \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

где β_i – задний угол в статике; $\Delta\beta_i = \arctg[V_2(t) / V_3(t)]$ – его уменьшение за счет изменения скоростей. Радиус при вершине инструмента и β_i при неизменных соотношениях скоростей изменяется за счет развития износа w . Кроме этого, учтем зависимость коэффициента трения от скорости. Тогда справедливо

$$\begin{cases} \Phi_1 = \rho_0 \left\{ \int_{t-T}^t [V_2 + d\Delta_2/dt - dX_2/dt] dt \right\} \times \\ \times \exp[\alpha_1 \beta_{\Sigma,1}(t)]; \\ \Phi_2 = \rho_0 [t_p^{(0)} + \Delta_1(t) - X_1(t)] \exp[\alpha_2 \beta_{\Sigma,2}(t)]; \\ \Phi_3 = k_T [\Phi_1 + \Phi_2], \end{cases} \quad (7)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты крутизны; ρ_0 – параметр жесткости; $k_T(V_3) = k_T [1 + \mu_1 \exp(-\alpha_T V_3)]$ – коэффициент трения.

Системы (6, 7), дополненные (2–5), позволяют исследовать устойчивость, притягивающие множества деформаций \mathbf{x} и сил \mathbf{F} , Φ , а также мощность необратимых преобразований энергии в области контакта граней инструмента с заготовкой. Траектории \mathbf{x} , \mathbf{F} , Φ и свойства изменяются, если варьируются параметры подсистем и динамической связи. Они изменяются также при варьировании $\Delta(\mathbf{t})$. Эти свойства, характеризующие замороженное (в смысле эволюционных изменений) состояние системы, было изучено ранее [37–42]. Мощность в области контакта задних граней $N_\Phi(t)$ является скалярной и зависит от суммы мощностей по всем направлениям движения. На основе (7) можно вычислить мощность $N_\Phi(t)$ и работу $A_\Phi(t)$ сил, формируемых в области контакта:

$$\begin{aligned} N_\Phi(t) = & A\Phi_1(t) \left[\frac{d(\Delta_1 - X_1)}{dt} \right] + \\ & + \Phi_2(t) \left[V_2 + \frac{d(\Delta_2 - X_2)}{dt} \right] + \\ & + k [\Phi_1(t) + \Phi_2(t)] \left[V_3 + \frac{d(\Delta_3 - X_3)}{dt} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда $A_\Phi(t) = \int_0^t N_\Phi(t) dt$. Дополнительно необходимо учитывать силы упругости, накопленной в зоне резания при переходе обрабатываемого материала через вершину режущего лезвия, и их мощность $N_F(t)$

$$\begin{aligned} N_F(t) &= k_F F_0(t) V_3(t); \\ N(t) &= N_F(t) + N_\Phi(t); \\ A(t) &= A_F(t) + A_\Phi(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где k_F – коэффициент, учитывающий преобразование сил в зоне резания в силы, действующие на задние грани; $N(t)$, $A(t)$ – суммарные мощность и работа. Анализ (8) и (9) показывает, что на выделение энергии оказывают влияние ТИЭС, возмущения, а также параметры подсистем и динамической связи.

Связь износа инструмента с эволюцией динамической системы

Износ вызывает вариации параметров P_i динамической связи

$$p_i = p_{i,0} + \Delta p_i(w), \quad (10)$$

где $p_{i,0}$ – исходный параметр; $\Delta p_i(w)$ – его приращение. При моделировании $N(t)$ и $A(t)$ являются наблюдаемыми.

Износ рассматривается в виде поверхности S_w , площадь которой определялась по сетке, как показано на рис. 2. Геометрию изношенной поверхности удобно аппроксимировать прямоугольником с основанием, равным длине контакта лезвия с заготовкой. Тогда износ w оценивается высотой прямоугольника площадью S_w . Связь $N(t)$ с $v^{(w)}$ не пропорциональна, так как при увеличении $N(t)$ изменяются все основные физические факторы взаимодействий. Эти изменения не мгновенны. В связи с этим при моделировании связи $N(t)$ и $v^{(w)}(t)$ воспользуемся двумя преобразованиями. Вначале рас-

смотрим промежуточную координату $N^{(\Pi)}$, определяемую уравнением Вольтерры [50]:

$$N^{(\Pi)}(t) = \left\{ N(t) + \eta \int_0^t W(t-\xi)N(\xi)d\xi \right\}, \quad (11)$$

где η – коэффициент (c^{-1}); $W(t-\xi)$ – безразмерное ядро. Затем учтем, что скорость изнашивания зависит от $N^{(\Pi)}$ нелинейно:

$$v^{(w)} = N^{(\Pi)} \begin{cases} \eta_1 N^{(\Pi)}, \\ \text{при } N^{(\Pi)} \in (0, N_0^{(\Pi)}); \\ [-(\eta_2 - \eta_1)N_0^{(\Pi)} + \eta_2 N^{(\Pi)}], \\ \text{при } N^{(\Pi)} > N_0^{(\Pi)}, \end{cases} \quad (12)$$

где η_1, η_2 – параметры, имеющие размерность $кг^{-1}$, ($\eta_1 < \eta_2$).

Приведенные представления опираются на макроскопический подход к анализу сложных систем [48]. Ядро интегрального оператора, как нами показано ранее [19, 47], удобно представить в виде

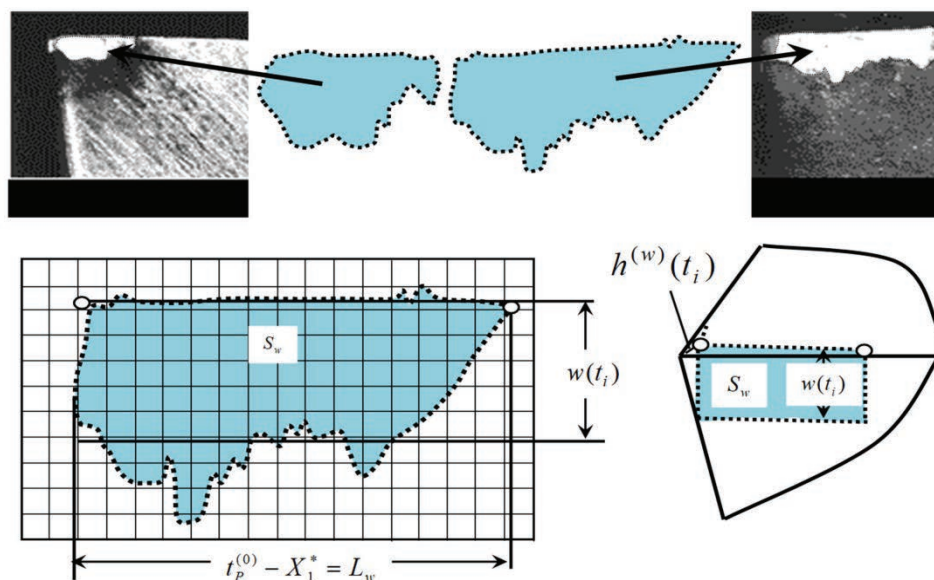


Рис. 2. Примеры фотографий износа и схема оценивания его параметров при продольном точении стали 1X18H9T инструментом из твердого сплава GC2015 на режимах:

$$V_3 = 1,0 \text{ м/с}, t_p^{(0)} = 2,5 \text{ мм}, S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм}$$

Fig. 2. Photo of wear and scheme of estimate wear parameters with longitudinal turning of steel 0.1C18Cr9Ni1Ti by the carbide tool GC2015 on regimes:

$$V_3 = 1,0 \text{ м/с}, t_p^{(0)} = 2,5 \text{ мм}, S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм}$$

$$W(t - \xi) = \left\{ \exp \left[-(T_1)^{-1}(t - \xi) \right] + \mu_v \exp \left[-(T_2)^{-1}(\xi - t) \right] \right\}, \quad (13)$$

где T_1, T_2 – параметры (с); μ_v – безразмерный параметр. Параметры $T_1, T_2, \mu_v, \eta_1, \eta_2$ и η определяются на основе экспериментальной динамики. Ядро оператора (13) моделирует два противоположных процесса изнашивания: адаптации и деградации свойств контакта граней инструмента с заготовкой. Анализ систем (2–9) и (14–16) выполнен численно. Поэтому $N(t)$ можно представить как

$$\mathbf{N} = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_n\}^T, \quad (14)$$

$$N_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{i-1}}^{t_i} N(t) dt.$$

Тогда вместо (14) справедливо

$$N^{(\Pi)}(n\Delta t) = \left\{ N_n + \eta \sum_{i=1}^{i=n} \left[\int_{(i-1)\Delta t}^{i\Delta t} \exp \left(-\frac{n\Delta t - \xi}{T_1} \right) N_i d\xi + \mu_v \int_{(i-1)\Delta t}^{i\Delta t} \exp \left(-\frac{\xi - n\Delta t}{T_2} \right) N_i d\xi \right] \right\},$$

или

$$N^{(\Pi)}(n\Delta t) = \left\{ N_n + \eta T_1 \sum_{i=1}^{i=n} N_i \left[\exp \left(-\frac{(n-i)\Delta t}{T_1} \right) - \exp \left(-\frac{(n-i+1)\Delta t}{T_1} \right) \right] - \mu_v \eta T_2 \sum_{i=1}^{i=n} N_i \times \left[\exp \left(\frac{(n-i)\Delta t}{T_1} \right) - \exp \left(\frac{(n-i+1)\Delta t}{T_1} \right) \right] \right\}. \quad (15)$$

Если $N_{i-1} = N_i = N$, то

$$N^{(\Pi)}(n\Delta t) = \left\{ N + \eta T_1 N \left[1 - \exp \left(-\frac{n\Delta t}{T_1} \right) \right] - \mu_v \eta T_2 N \left[1 - \exp \left(\frac{n\Delta t}{T_1} \right) \right] \right\}.$$

Таким образом, вариации N_i «окрашивают» развитие износа за счет изменения параметров p_i , зависящих от износа и влияющих на динамические свойства системы. При этом, как показано ранее [37–42], в ходе эволюции наблюдаются бифуркации притягивающих множеств деформаций, и точки бифуркации могут иметь высокую чувствительность к малым вариациям начальных параметров $p_{i,0}$ и возмущений [44]. Эволюционные свойства зависят от p_i и ТИЭС.

В связи с этим имеет место проблема выбора ТИЭС, при которых путь резания при достижении критического износа максимален. Для определения интенсивности изнашивания $v_w^{(l)}$ можно воспользоваться очевидным соотношением

$$v_w^{(l)} = \frac{dw}{dl} = \frac{v_w}{V_\Sigma}, \quad (16)$$

где $V_\Sigma = \text{Mod}[d\mathbf{L}^{(\Phi)} / dt]$ – проекция суммарной скорости на направление движения.

Результаты и их обсуждение

Оптимизация траекторий исполнительных элементов

При выборе ТИЭС, при которых интенсивность изнашивания минимальна, главное значение имеет траектория скорости резания $V_3(Z)$. Рассмотрим проблему оптимизации на примере продольного точения вала штуцера гидросистемы вертолета МИ-29 из аустенитной стали 08X15H24B4TP в условиях ПАО «Роствертол». Обработка выполнялась неперетачиваемыми пластинами фирмы SANDVIK Coromant из сплава GC2015, форма пластины – «W». Геометрия: $\alpha = 2^\circ$; $\gamma = 6^\circ$; $\varphi = 90^\circ$. Обработка производилась без СОЖ на станке L440 с ЧПУ (система Siemens Sinumerik 828 D Basis T). В подсистеме инструмента жесткости совпадают с осями $\mathfrak{R}^{(3)}$, так как $\varphi = 90^\circ$; $\mathbf{m} = [m_{s,k}]$, $m_{s,s} = m_0$; $\mathbf{h} = [h_{s,k}]$, $h_{s,s} = h_0$, $m_{s,k} = h_{s,k} = 0$ при $s \neq k$, $s, k = 1, 2, 3$. Подсистема инструмента: $c_{1,0} = 3000$ кг/мм, $c_{2,0} = 1000$ кг/мм, $c_{3,0} = 600$ кг/мм; $h_0 = 5,0$ кг·с/мм; $m_0 = 0,025$ кг·с²/мм. Параметры динамической

связи даны в табл. 1, а интегрального оператора – в табл. 2.

При идентификации параметров использованы методы экспериментальной динамики, подробно изложенные в работах [19, 49, 51–53]. Приведем пример эволюции динамической системы резания и износа (рис. 3). Сплошной линией на диаграмме износа показана вычисленная траектория, треугольниками – экспериментальные точки. Известно [4], что вариации глубины $t_p^{(0)}$ мало влияют на интенсивность изнашивания $v_w^{(l)}$. Это связано с тем, что приведенные к единице контактной поверхности характеристики взаимодействий остаются практически неизменными при условии, что равновесие системы остается асимптотически устойчивым. Однако вариации глубины $t_p^{(0)}$ принципиально изменяют условия самовозбуждения, зависящие от отношения $\rho t_p^{(0)}$ к приведенной суммарной жесткости. В результате изменение глубины с 0,5 до 3,0 мм увеличивает среднюю интенсивность изнашивания более чем в два раза.

Это обусловлено потерей устойчивости равновесия, формированием различных притягивающих множеств деформаций вдоль траектории движения суппорта, их бифуркациями и, как следствие, изменением сил, которые синфазно со скоростью увеличиваются, вызы-

вая всплески мощности. При каждом всплеске изменяется соотношение между адгезионными, диффузионными и другими физическими взаимодействиями. У системы обнаруживаются свойства эмерджентности, естественные в сложных многосвязных нелинейных системах.

Пример показывает, что $v_w^{(l)}$ зависит от свойств ДСР, которые могут изменяться не только от параметров взаимодействующих подсистем и объединяющей их динамической связи, но и от управляемых и неуправляемых возмущений, а также в ходе эволюции системы. Пример также показывает, что вариации интенсивности изнашивания при определенных технологических режимах могут быть весьма чувствительными даже к малым их вариациям. В связи с этим оптимальные технологические режимы, например, рекомендованные фирмой SANDVIK Coromant, необходимо корректировать в зависимости от состояния станка, определяемого неуправляемыми возмущениями и параметрами динамических подсистем. Коррекция состоит, прежде всего, в выборе скорости резания, при которой мощность необратимых преобразований в сопряжении граней инструмента с заготовкой соответствует оптимальному значению. В этом и заключается согласование технологических режимов и соответствующих им ТИЭС с динамическими свойствами системы. Здесь возможно два подхода.

Таблица 1

Table 1

Параметры динамической связи процесса резания

The parameters dynamic link of the cutting process

ρ , кг/мм ²	$\alpha = \alpha_T$, с/м	$\mu = \mu_1$	ρ_0 , кг/мм	k , мм ⁻¹	$\alpha_1 = \alpha_2$, рад ⁻¹	k_T
500	2,0	0,5	50,0	5×10^{-3}	20	0,2

Таблица 2

Table 2

Параметры интегрального уравнения

The parameters of integral equation

Скорость, м/с	T_1 , с	T_2 , с	η , с ⁻¹	η_1 , кг ⁻¹	η_2 , кг ⁻¹
1,2	13	30	0,5	8×10^{-6}	3×10^{-6}

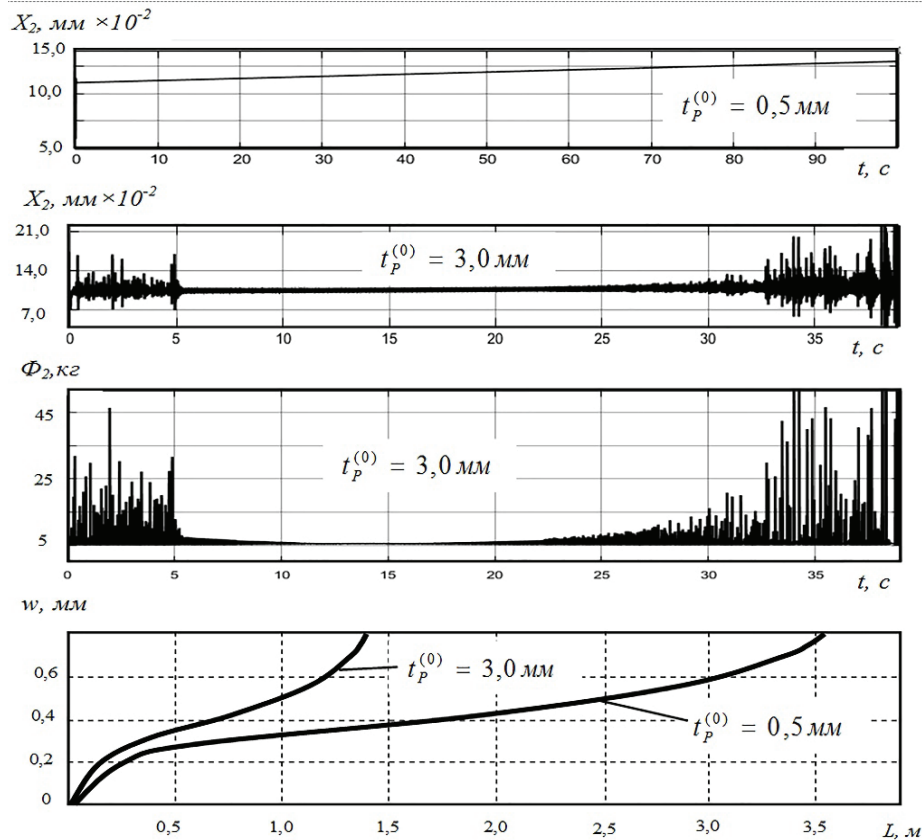


Рис. 3. Пример изменений траектории деформационных смещений в направлении X_2 соответствующих сил Φ_2 , действующих на заднюю грань, и эволюции износа. Режимы резания:

$$S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм}; V_3^{(0)} = 1,2 \text{ м/с}; t_p^{(0)} = \text{var}$$

Fig. 3. Changes of deformational displacement trajectories in direction X_2 , corresponding forces Φ_2 are acting on back side and evolution of wear. Cutting regimes:

$$S_p^{(0)} = 0,1 \text{ mm}; V_3^{(0)} = 1,2 \text{ m/s}; t_p^{(0)} = \text{var}$$

Первый подход не учитывает эволюцию системы. Тогда определяются неизменные в течение всего времени функционирования технологические режимы, соответствующие им ТИЭС и программа ЧПУ. Приведем пример реализации такого подхода.

Рассмотрим изменения $v_w^{(l)}$ от $V_3(Z) = \text{const}$ при различных режимах и радиальных биениях шпиндельной группы. Частота биений зависит от V_3 , а при $V_3(Z) = \text{const}$ – от диаметра вала. Приведенные зависимости (см. рис. 4, а) показывают, что оптимальная по износостойкости скорость резания остается практически неизменной при вариациях глубины резания до $t_p^{(0)} = 1,5$ мм. В этом случае система остается устойчивой на всем протяжении эволюционной

траектории. Ранее показано [49, 50], что при увеличении скорости резания существует ограниченный ее диапазон, в котором запас устойчивости максимален. Он ограничен снизу свойствами запаздывания сил по отношению к вариациям площади среза (3, 5), а сверху – условиями параметрического самовозбуждения. Действительно, при увеличении амплитуды радиальных биений шпиндельной группы, во-первых, уменьшается стойкость, во-вторых, оптимальное значение скорости смещается в область малых значений (рис. 4, б). Приведенные на рис. 4 результаты получены для режимов резания, которые не изменялись вдоль траектории движения инструмента относительно заготовки. Анализ показывает, что в ходе эволюции имеет место монотонное или быстрое (в результате бифуркаций притягивающих множеств деформаций) изменение сил,

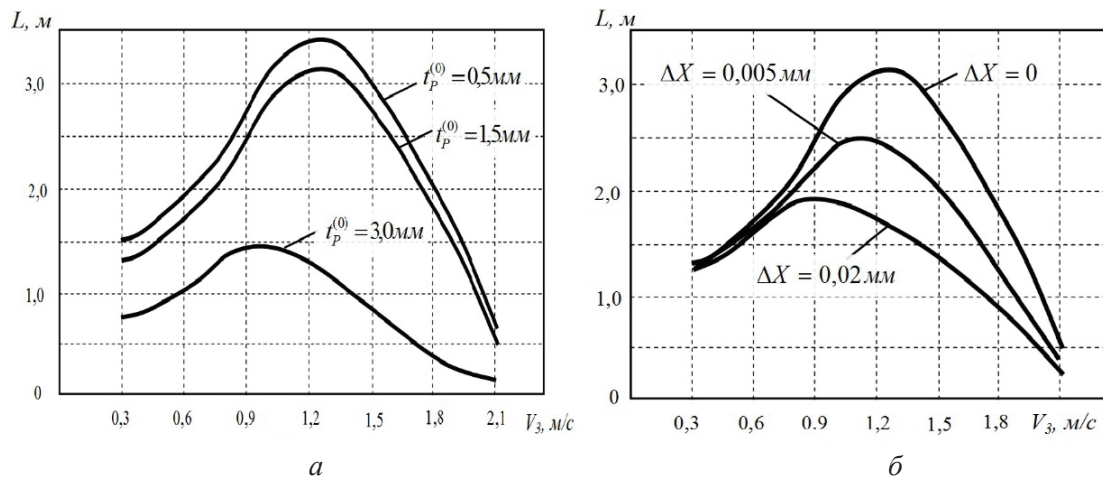


Рис. 4. Примеры изменения пути резания при достижении износа 0,8 мм по задней грани:

a – изменение пути резания в зависимости от глубины $t_p^{(0)}$; b – изменение пути резания в зависимости от амплитуды радиальных биений ΔX

Fig.4. Changes of cutting path with achieving wear 0,8 mm on the back side:

a – changes of cutting path in depends on cutting depth $t_p^{(0)}$; b – changes of cutting path in depends on amplitude of radial beating ΔX

мгновенных и средних на временном отрезке, действующих на задние грани инструмента (см. пример на рис. 3). Поэтому тезис об оптимальных значениях мощности необратимых преобразований энергии в областях сопряжения граней является справедливым лишь на начальной стадии эволюции ДСР.

Если обеспечить достаточный запас устойчивости системы, то удастся на рассмотренном примере обеспечить путь резания до критического износа 0,8 мм в среднем на уровне 3000 м. Во избежание недоразумений отметим, что это не путь суппорта, а путь вершины инструмента относительно заготовки. Максимальный путь до критического износа будет существенно сокращаться в случае потери устойчивости равновесия, увеличения биений шпинделя и (или) других возмущений (например, кинематических). Другими словами, изнашиваемость зависит как от параметров динамической системы резания, так и от состояния и точности узлов станка, обеспечивающих движение исполнительных элементов. Таким образом, первый подход позволяет согласовать режимы и, следовательно, программу ЧПУ с динамическими свойствами системы без учета эволюции системы резания.

Второй подход принимает во внимание динамическую перестройку системы резания в процессе обработки. Так как в ходе эволюции изменяются динамические свойства системы, влияющие на мощность необратимых преобразований энергии в сопряжении граней инструмента и заготовки, то каждому этапу эволюционных изменений должны соответствовать свои оптимальные режимы и ТИЭС. Понятие оптимальных технологических режимов (неизменной точки в пространстве технологических режимов) с учетом эволюции системы преобразуется в понятие оптимальной траектории технологических режимов. Оптимальным траекториям соответствует перестраиваемая программа ЧПУ. Однако непрерывное изменение программы сопряжено с вычислительными сложностями. Поэтому в условиях ПАО «Роствертол» было принято решение о дискретной перестройке программы таким образом, что после обработки каждой детали программными методами на основе априорной информации осуществляется изменение программы. В приведенном примере рассматривались три перестраиваемые программы, которым соответствовала обработка трех деталей. Расчеты показывают, что при переходе к оптимизации траектории технологических режимов вдоль траектории движения инструмента увеличивается стойкость инструмента на 20...30 % для случая, когда в ходе эволюции равновесие системы в подвижной системе координат является асимптотически устойчивым. В зависимости от динамической системы резания стойкость можно увеличить в 5...6 раз, если в ходе эволюции

яющие на мощность необратимых преобразований энергии в сопряжении граней инструмента и заготовки, то каждому этапу эволюционных изменений должны соответствовать свои оптимальные режимы и ТИЭС. Понятие оптимальных технологических режимов (неизменной точки в пространстве технологических режимов) с учетом эволюции системы преобразуется в понятие оптимальной траектории технологических режимов. Оптимальным траекториям соответствует перестраиваемая программа ЧПУ. Однако непрерывное изменение программы сопряжено с вычислительными сложностями. Поэтому в условиях ПАО «Роствертол» было принято решение о дискретной перестройке программы таким образом, что после обработки каждой детали программными методами на основе априорной информации осуществляется изменение программы. В приведенном примере рассматривались три перестраиваемые программы, которым соответствовала обработка трех деталей. Расчеты показывают, что при переходе к оптимизации траектории технологических режимов вдоль траектории движения инструмента увеличивается стойкость инструмента на 20...30 % для случая, когда в ходе эволюции равновесие системы в подвижной системе координат является асимптотически устойчивым. В зависимости от динамической системы резания стойкость можно увеличить в 5...6 раз, если в ходе эволюции

равновесие системы неустойчиво и в системе в ходе эволюции наблюдаются бифуркации притягивающих множеств деформаций и сил. Этот вывод сделан на основе выполнения цифрового моделирования эволюционной системы резания с использованием при моделировании алгоритмов стабилизации мощности необратимых преобразований в сопряжении главной боковой грани инструмента и заготовки путем изменения скорости резания. Дискретная же перестройка программы, проверенная в условиях ПАО «Роствертол», позволяет повысить эффективность изготовления в стоимостном выражении в 1,2 раза.

Заключение

Приращение износа инструмента по пути, то есть интенсивность его изнашивания, зависит от мощности необратимых преобразований энергии в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. Причем существует оптимальное ее значение, при котором интенсивность изнашивания минимальна. Показано, что эта мощность зависит от свойств динамической системы резания, характеризующихся притягивающими множествами деформационных смещений вершины инструмента относительно заготовки, и сил, рассматриваемых в подвижной системе координат исполнительных элементов станка, задаваемых программой ЧПУ. Поэтому для каждой динамической системы резания, свойства которой изменяются, существуют такие совокупности режимов – прежде всего, скорости резания, – при которых интенсивность изнашивания минимальна. Приведенные математические модели и разработанные методики позволяют определять технологические режимы – прежде всего, скорость резания, при которой для заданной динамической системы мощность необратимых преобразований энергии является оптимальной по критерию интенсивности изнашивания инструмента. Определение технологических режимов в этом случае есть синергетическое согласование внешнего управления с внутренней динамикой системы резания, характерной для рассматриваемого станка. Кроме этого, процесс резания на конкретном станке обладает свойством эволюционной перестройки свойств. Поэтому эффективность процесса резания можно дополнительно

повысить на основе согласования в ходе эволюции технологических режимов и изменяющихся свойств системы. В этом случае вводится понятие оптимальной траектории технологических режимов, которой соответствует перестраиваемая программа ЧПУ, согласованная с эволюцией динамической системы резания. При практической реализации перестраиваемой программы, как показано опытно-промышленными испытаниями, удобно выполнять изменение программы дискретно после обработки каждой детали из партии. Приведенные материалы позволяют не только объяснить экспериментально известные факты зависимости изнашивания от динамических особенностей процесса резания, но и определить неиспользуемые направления увеличения эффективности обработки на конкретном станке.

Список литературы

1. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке / Донской государственный технический университет. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2019. – 289 с. – ISBN 978-5-7890-1669-5.
2. *Старков В.К.* Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0.
3. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
4. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
5. *Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С.* Резание металлов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 447 с. – ISBN 5-7038-1823-0.
6. *Бершадский Л.И.* Самоорганизация трибосистем и концепция износостойкости // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 6. – С. 1077–1094.
7. *Костецкий Б.И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Проблемы трения и изнашивания. – 1986. – № 6. – С. 287–295.
8. *Мигранов М.Ш.* Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65–71.
9. *Ким В.А., Якубов Ч.Ф.* Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 12. – С. 35–45. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-35-45.



10. Каримов И.Г. Влияние температуры резания на энергетические параметры контакта инструмента с деталью // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 44 (49). – С. 85–89.
11. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction / J.R. Gomez-Solano, C. July, J. Mehl, C. Bechinger // *New Journal of Physics*. – 2015. – Vol. 17. – P. 045026. – DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
12. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach // *Tribology in Industry*. – 2014. – Vol. 36, N 4. – P. 341–347.
13. Bryant M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear // *FME Transactions*. – 2009. – Vol. 37, no. 2. – P. 55–60. – DOI: 10.3390/e12061345.
14. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear // *Encyclopedia of Tribology*. – Boston, MA: Springer, 2013. – P. 3622–3636. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
15. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs // *World Applied Sciences Journal*. – 2014. – Vol. 30 (8). – P. 958–963. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
16. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes // *Computers and Industrial Engineering*. – 2006. – Vol. 50, N 12. – P. 15–34. – DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.
17. Key role of excess atomic volume in structural rearrangements at the front of moving partial dislocations in copper nanocrystals / S.G. Psakhie, K.P. Zolnikov, D.S. Kryzhevich, A.V. Korchuganov // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 3867. – DOI: 10.1038/s41598-019-40409-9.
18. Bicanic N. Discrete element methods // *Encyclopedia of Computational Mechanics*. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 2017. – P. 1–38. – DOI: 10.1002/0470091355.ecm006.
19. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания: синергетический подход. – Ростов н/Д.: Терра, 2006. – 880 с.
20. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 12. – С. 19–24.
21. Постнов В.В., Шафииков А.А. Разработка эволюционной модели изнашивания режущего инструмента для управления процессом обработки // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 11, № 2 (29). – С. 139–146.
22. Патент 2538750 Российская Федерация. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки / Козочкин М.П., Федоров С.В., Терешин М.В. – № 2013123625/02; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.01.2015.
23. Зариктуев В.Ц. Автоматизация процессов на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.12, № 4. – С. 14–19.
24. Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2017. – № 2 (51). – С. 9–23.
25. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gousskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2002. – Vol. 7. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/s1007-5704(02)00014-x.
26. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system / Y.-C. Kao, N.-T. Nguyen, M.-S. Chen, S.T. Su // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 77, N 9–12. – P. 1793–1809. – DOI: 10.1007/s00170-014-6550-8.
27. Approximate analytical solutions for primary chatter in the non-linear metal cutting model / J. Warminski, G. Litak, M.P. Cartmell, R. Khanin, M. Wiercigroch // *Journal of Sound and Vibration*. – 2003. – Vol. 259 (4). – P. 917–933. – DOI: 10.1006/jsvi.2002.5129.
28. Stepan G., Insperge T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2005. – Vol. 15, N 9. – P. 2783–2798. – DOI: 10.1142/S0218127405013642.
29. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process // *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*. – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 793–819. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0755.
30. Davies M.A., Pratt J.R. The stability of low immersion milling // *CIRP Annals*. – 2000. – Vol. 49. – P. 37–40. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62891-1.
31. Stability prediction for low radial immersion milling / M.A. Davies, J.R. Pratt, B.S. Dutterer, T.J. Burns // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2002. – Vol. 124. – P. 217–225. – DOI: 10.1115/1.1455030.
32. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling / R.P.H. Faassen, N. van de Wouw, J.A.J. Osterling, H. Nijmeijer // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43. – P. 1437–1446. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8.
33. Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation – Part 1: An analytical solution // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 126. – P. 467–474. – DOI: 10.1115/1.1765137.
34. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness / G. Peigne, H. Paris, D. Brissaud, A. Gousskov // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.

- ture. – 2004. – Vol. 44. – P. 1133–1142. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012.
35. Szalai R., Stepan G., Hogan S.J. Global dynamics of low immersion high-speed milling // *Chaos*. – 2004. – Vol. 14. – P. 1069–1077. – DOI: 10.1063/1.1807395.
36. Hasnul H. The parametric effect and optimization on JIS S45C steel turning // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2011. – Vol. 3, N 5. – P. 4479–4487.
37. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotny, A.D. Lukyanov, A.A. Gubanova, V.V. Khristoforova // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
38. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2014. – Vol. 24 (9). – P. 189–201. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.
39. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 89. – P. 167–176. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.
40. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal – cutting tool // *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2015. – Vol. 10. – P. 102–116.
41. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Attractive manifolds in end milling // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, N 2. – P. 158–163. – DOI: 10.3103/S1068798X17020198.
42. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. – 2018. – Т. 26, № 5. – С. 20–38. – DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.
43. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Зависимость изнашивания инструмента и параметров качества формируемой резанием поверхности от динамических характеристик // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 31–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46.
44. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.
45. Понтрягин Л.С. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – 576 с. – ISBN 5-02-14410-X.
46. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений с малыми параметрами при старших производных // *Математический сборник*. – 1952. – Т. 31, № 3. – С. 575–586.
47. Мышкис А.Д. Математика для вузов: специальные курсы. – М.: Наука, 1971. – 640 с.
48. Haken H. Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 251 p.
49. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2017. – № 2 (194). – С. 52–61. – DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-52-61.
50. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами // *СТИН*. – 2016. – № 8. – С. 27–33.
51. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2011. – № 2 (160). – С. 38–46.
52. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 11, № 2 (53). – С. 137–146.
53. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 11, № 3 (54). – С. 301–311.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science





Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Influence of Cutting Dynamic on the Selection of the Technological Regimes to Ensure Minimal Wear of Cutting Tools

Vilor Zakovorotny^a, Valery Gvindjiliya^{b, *}

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  sinedden@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 August 2020

Revised: 28 August 2020

Accepted: 17 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Cutting efficiency

Nonlinear dynamic

Self-organization

Wear tool intensity

Technological regimes

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research projects: “Development of the theory of analysis and synthesis of controlled self-organization in a dynamic cutting system during processing on the example of manufacturing parts on lathes”, No. 19-08-00022; “Development of methods for analysis and synthesis of a dynamic cutting system based on the criterion of minimizing the reduced manufacturing costs”, No. 20-38-90074.

ABSTRACT

Introduction. The intensity of tool wear, as an increment of wear to the cutting path, characterizes one of the important processing indicators. It is used in the development of algorithms for controlling the cutting process, including the calculation of trajectories in CNC machines. As the cutting speed increases, there is a value at which the wear rate is minimal. It corresponds to the optimal value of heat production in the cutting zone, that is, the power of irreversible transformations of the energy supplied to cutting. Heat production depends on the dynamic system parameters that change along the tool path. In this regard, at the initial stage and during processing, it is necessary to coordinate the control with the properties of the dynamic cutting system. **Subject.** The paper offers a study and analysis of the relationship between the tool wear rate and the dynamic properties of the cutting process, and on this basis, the definition of technological modes in which the wear rate is minimal. **The purpose of this work** is to study the dependence of the tool wear rate on the initial and changing dynamic properties of processing along the path, and to create on this basis methods for matching technological modes with the current cutting dynamics to reduce the wear rate. **Method and methodology of the work.** In this paper, experimental and analytical methods are used to study the evolutionary changes in the properties of the system in relation to the development of tool wear. The developed mathematical models of the cutting system are presented, which differ from the known ones in that the power of irreversible energy transformations of the mechanical system in the interface of the back faces of the tool with the workpiece is additionally modeled. The dependence of the wear rate on the power of irreversible transformations, that is, on a given time interval in the increment of wear, is given. This takes into account the dependence of wear on the dynamic properties of the cutting system, including during its evolution. **Results and discussions.** It is shown that the properties of evolution are sensitive to small variations in the parameters of the dynamical system. These variations make significant changes in the wear rate. The paper reveals the dependence of wear on the properties of a dynamic system, that is, on its parameters, technological modes, beats, and other perturbations. **Conclusions.** The disclosure of the dependence of wear resistance on the dynamic properties of the cutting process characterizes new ideas about the factors that affect wear resistance.

For citation: Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of cutting dynamic on the selection of the technological regimes to ensure minimal wear of cutting tools. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 54–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70. (In Russian).

References

1. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoy obrabotke* [Synergetics of tool wear in blade processing]. Rostov-on-Don, Don state technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 9785789016695.
2. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p. ISBN 978-5-94275-460-0.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Post-graduate Student

Don State Technical University,

1 Gagarin square,

344000, Rostov-on-Don, Russian Federation

Tel.: +7 (918) 583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

3. Loladze T.N. *Prochnost' i iznosostoikost' rezhushchego instrumenta* [Strength and wear resistance of the cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 320 p.
4. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
5. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie metallov: termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosvyazei pri rezanii* [Metal cutting: a thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 447 p. ISBN 5-7038-1823-0.
6. Bershadskii L.I. Samoorganizatsiya tribosistem i kontseptsiya iznosostoikosti [Self-organization of tribosystems and the concept of wear resistance]. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 1992, vol. 13, no. 6, pp. 1077–1094. (In Russian).
7. Kostetskii B.I. Strukturno-energeticheskaya prisposoblivaemost' materialov pri trenii [Structural and energy adaptability of materials under friction]. *Problemy treniya i iznashivaniya = Friction and Wear Problems*, 1986, no. 6, pp. 287–295.
8. Migranov M.Sh. Issledovaniya iznashivaniya instrumental'nykh materialov i pokrytii s pozitsii termodinamiki i samoorganizatsii [Research of wear of tool materials and coatings from the positions of thermodynamics and self-organization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–71.
9. Kim V.A., Yakubov Ch.F. Dissipativnaya struktura kontaktno-frikcionnogo vzaimodejstviya [Dissipative structure of contact-friction interaction at metal cutting]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, no. 12, pp. 35–45. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-35-45.
10. Karimov I.G. Vliyanie temperatury rezaniya na energeticheskie parametry kontakta instrumenta s detal'yu [Influence of the cutting temperature on the energy parameters of the tool contact with the part]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 16, no. 44 (49), pp. 85–89.
11. Gomez-Solano J.R., July C., Mehl J., Bechinger C. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, vol. 17, p. 045026. DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
12. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.
13. Bryant M.D. Entropy and dissipative processes of friction and wear. *FME Transactions*, 2009, vol. 37, no. 2, pp. 55–60. DOI: 10.3390/e12061345.
14. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, Springer, 2013, pp. 3622–3636. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
15. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. *World Applied Sciences Journal*, 2014, no. 30 (8), pp. 958–963. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
16. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 12, pp. 15–34. DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.
17. Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V. Key role of excess atomic volume in structural rearrangements at the front of moving partial dislocations in copper nanocrystals. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, p. 3867. DOI: 10.1038/s41598-019-40409-9.
18. Bicanic N. Discrete element methods. *Encyclopedia of Computational Mechanics*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2017, pp. 1–38. DOI: 10.1002/0470091355.ecm006.
19. Zakovorotnyi V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessa rezaniya: sinergeticheskii podkhod* [Dynamics of the cutting process]. Rostov-on-Don, Terra Publ., 2006. 880 p.
20. Zakovorotnyi V.L., Shapovalov V.V. *Dinamika transportnykh tribosistem* [Dynamics of transport tribosystem]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in Machine-Building, Instrument-Making*, 2005, no. 12, pp. 19–24.
21. Postnov V.V., Shafikov A.A. Razrabotka evolyutsionnoi modeli iznashivaniya rezhushchego instrumenta dlya upravleniya protsessom obrabotki [Development of an evolutionary model of cutting tool wear to control the processing process]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 11, no. 2 (29), pp. 139–146.
22. Kozochkin M.P., Fedorov S.V., Tereshin M.V. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya v protsesse metalloobrabotki* [Method for determining the optimal cutting speed in the process of Metalworking]. Patent RF, no. 2538750, 2015.



23. Zariktuev V.Ts. Avtomatizatsiya protsessov na osnove polozheniya ob optimal'noi temperature rezaniya [Automatization of process based on concept of optimal cutting temperature]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 14–19.

24. Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineinnye zadachi dinamiki protsessov rezaniya [Nonlinear problems of cutting process dynamics]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical engineering and engineering education*, 2017, no. 2 (51), pp. 9–23.

25. Gousskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, vol. 7, pp. 207–221. DOI: 10.1016/s1007-5704(02)00014-x.

26. Kao Y.-C., Nguyen N.-T., Chen M.-S., Su S.T. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, no. 9–12, pp. 1793–1809. DOI: 10.1007/s00170-014-6550-8.

27. Warminski J., Litak G., Cartmell M.P., Khanin R., Wiercigroch M. Approximate analytical solutions for primary chatter in the non-linear metal cutting model. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 259 (4), pp. 917–933. DOI: 10.1006/jsvi.2002.5129.

28. Stepan G., Insperge T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.

29. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 793–819. DOI: 10.1098/rsta.2000.0755.

30. Davies M.A., Pratt J.R. The stability of low immersion milling. *CIRP Annals*, 2000, vol. 49, pp. 37–40. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62891-1.

31. Davies M.A., Pratt J.R., Dutterer B.S., Burns T.J. Stability prediction for low radial immersion milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, pp. 217–225. DOI: 10.1115/1.1455030.

32. Faassen R.P.H., Wouw N. van de, Osterling J.A.J., Nijmeijer H. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1437–1446. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8.

33. Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation – Part 1: An analytical solution. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, pp. 467–474. DOI: 10.1115/1.1765137.

34. Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gousskov A. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 1133–1142. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012.

35. Szalai R., Stepan G., Hogan S.J. Global dynamics of low immersion high-speed milling. *Chaos*, 2004, vol. 14, pp. 1069–1077. DOI: 10.1063/1.1807395.

36. Hasnul H. The parametric effect and optimization on JIS S45C steel turning. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 4479–4487.

37. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D., Gubanov A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 368, pp. 174–190. DOI: /10.1016/j.jsv.2016.01.020.

38. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, 24 (9), pp. 189–201. DOI: 10.1142/S0218127414501156.

39. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 89, pp. 167–176. DOI: /10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.

40. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal – cutting tool. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2015, vol. 10, pp. 102–116.

41. Zakovorotny V.L., Gubanov A.A., Lukyanov A.D. Attractive manifolds in end milling. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 158–163. DOI: 10.3103/S1068798X17020198.

42. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Bifurkatsii prityagivayushchikh mnozhestv deformatsionnykh smeshchennii rezhushchego instrumenta v khode evolyutsii svoystv protsessa obrabotki [Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 20–38. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.

43. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Zavisimost' iznashivaniya instrumenta i parametrov kachestva formiruemoi rezaniem poverkhnosti ot dinamicheskikh kharakteristik [The dependence of tool wear and quality parameters of

the surface being cut on dynamic characteristics]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 31–46. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46.

44. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Svyaz' samoorganizatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya s iznashivaniem instrumenta [Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

45. Pontryagin L.S. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 576 p. ISBN 5-02-14410-X.

46. Tikhonov A.N. Sistemy differentsial'nykh uravnenii s malymi parametrami pri starshikh proizvodnykh [Systems of differential equations containing small parameters in the derivatives]. *Matematicheskii sbornik = Sbornik: Mathematics*, 1952, vol. 31, no. 3, pp. 575–586. (In Russian).

47. Myshkis A.D. *Matematika dlya vtuzov: spetsial'nye kursy* [Mathematics for higher education institutions: special courses]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 640 p.

48. Haken H. *Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 251 p.

49. Zakovorotny V.L., Gvinjiliya V.E. Vliyanie fluktuatsii na ustoichivost' formoobrazuyushchikh traektorii pri tochenii [The influence of fluctuation on the shape-generating trajectories stability with a turning]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2017, vol. 2 (194), pp. 52–61. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-52-61.

50. Zakovorotny V.L., Gubanov A.A., Lukyanov A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevymi frezami [Attracting sets when milling with end mills]. *STIN = Machines and Tooling*, 2016, no. 8, pp. 27–33.

51. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.T. Matematicheskoe modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya dinamicheskikh svoistv podsistem instrumenta i zagotovki pri tochenii [Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of the subsystems of the cutting tool and workpiece in the turning]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2011, vol. 2 (160), pp. 38–46.

52. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.T., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz') [Modeling of the dynamic connection formed by the turning process in problems of cutting process dynamics (speed connection)]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 2 (53), pp. 137–146.

53. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.T., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (pozitsionnaya svyaz') [Modeling of the dynamic connection formed by the turning process in problems of cutting process dynamics (positional connection)]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).