Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2019 Том 21 № 4 с. 31–46
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Зависимость изнашивания инструмента и параметров качества формируемой резанием поверхности от динамических характеристик

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: 19 сентября 2019
Рецензирование: 15 октября 2019
Принята к печати: 15 ноября 2019
Доступно онлайн: 15 декабря 2019

Ключевые слова:
Динамическая система точения
Скорость изнашивания
Качество формируемой резанием поверхности

Финансирование
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-08-00022.

АННОТАЦИЯ

Введение. Известно, что износ и качество поверхности детали изменяются в ходе обработки. Эти изменения зависят от динамической системы резания. Известны также исследования в области динамики процесса резания, в которых рассматриваются проблемы устойчивости формируемых в окрестностях траекторий различных притягивающих множеств деформационных смещений. Анализируются и бифуркации притягивающих множеств, в том числе связанные с выделением энергии в зоне обработки. Однако исследование связи эволюционной перестройки системы с выходными свойствами процесса резания в единстве интенсивности изнашивания инструментов и формируемой резанием геометрической топологии поверхности не выполнено. В статье развиваются положения эволюционных преобразований динамической системы резания на случай анализа выходных характеристик процесса резания. **Целью работы** является раскрытие взаимосвязи эволюционной перестройки динамической системы резания с износостойкостью инструмента и изменением геометрической топологии формируемой резанием поверхности для обеспечения требуемых выходных характеристик обработки. **Предлагается** методика и приводятся результаты изучения изменения скорости изнашивания, величины износа и изменения геометрической топологии формируемой резанием поверхности в зависимости от исходных технологических режимов и динамических параметров системы в ходе эволюционной перестройки. **Методами исследований являются:** математическое моделирование эволюционных преобразований на основе представления зависимости параметров динамической связи, формируемой процессом резания, в виде их зависимости от траектории мощности необратимых преобразований в узлах сопряжений граней инструмента с заготовкой и зоной резания. При этом рассматривается преобразование мощности в скорость изнашивания инструмента и изменение геометрической топологии поверхности. **Результаты и обсуждение**. Раскрыты зависимости износа и геометрии поверхности от эволюционно изменяющихся свойств динамической системы резания. Поставлена задача согласования проектируемых траекторий с внутренней эволюционно изменяющейся динамикой системы для повышения эффективности обработки. Результаты исследований перспективны особенно для обработки деталей сложного геометрического профиля, а также деталей, матрицы жесткости которых изменяются вдоль траектории инструмента.

Для цитирования: *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.

Введение

Резание представляет систему, в которой взаимодействуют механические, термодинамические, молекулярные, химические и другие процессы [1–6]. Они влияют на динамику и обладают свойством «медленной» эволюции, отображающей накопление необратимых преобразований энергии на гранях инструмента, изменяют превалирующие механизмы физических взаимодействий и формирование диссипативных структур [1]. Первичным источником изменений является мощность необратимых преобразований и ее предыстория, влияющая на скорость изнашивания и параметры качества деталей [6–8]. При моделировании эволюции необходимо рассмотреть модели динамики резания [9–42]. Как правило, рассматривались уравнения в вариациях относительно равнове-

***Адрес для переписки**
Гвинджилия Валерия Енвериевна, 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

сия в подвижной системе координат, движение которой задается траекториями исполнительных элементов станка [43]. Эти траектории задаются и обеспечиваются внешним управлением. Рассматривались проблемы асимптотической устойчивости [9 –20, 27, 29, 36, 38], формирования предельных циклов [14–17, 26, 39], инвариантных торов [35, 39] и хаотических аттракторов [13, 35, 37]. При раскрытии механизмов самовозбуждения рассматривались позиционные связи [9–14], запаздывание сил по отношению к деформациям [9, 14–17, 37], регенерация следа [9, 25–29], фрикционные взаимодействия [33–35], параметрическое самовозбуждение [31, 36, 40–42]. Следующим этапом становления знаний о динамической системе является влияние неуправляемых возмущений (биения шпинделя, кинематические и другие возмущения) [44–46]. Имеются также работы, направленные на изучение эволюционной перестройки системы за счет необратимых преобразований энергии в зоне резания [47–50]. Если обобщить представления о динамической системе, то ее можно раскрыть на основе использования следующей модели [37, 50]:

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=$$

$$=F_{\Sigma}(X,V_{i,0},p_s),\ \ i=1,2,3;\ \ s=1,2,...k, \quad (1)$$

где $m = [m_{s,k}]$, $m_{s,k} = m$, при $s = k$; $m_{s,k} = 0$ при $s \neq k$ в кгс^2/мм; $h = [h_{s,k}]$ в кгс/мм, $c = [c_{s,k}]$ в кг/мм, s, k = 1, 2, 3 – симметричные, положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $X=\{X_1,X_2,X_3\}^{\mathrm{T}}$ – вектор упругих деформаций инструмента относительно несущей системы станка в [мм]; $F_{\Sigma}=\left\{F_{\Sigma1}(X,V_{1,0},V_{2,0},V_{3,0},p_i),\right.$ $F_{\Sigma2}(X,V_{1,0},V_{2,0},V_{3,0},p_i),$ $F_{\Sigma3}(X,V_{1,0},V_{2,0},V_{3,0},p$ $\left.p_i)\right\}^{\mathrm{T}}$ – математическая модель динамической связи, формируемой резанием ($V_{1,0}$, $V_{2,0}$, $V_{3,0}$ – скорости поперечного и продольного суппортов, а также скорость резания). Параметры $V_{1,0}$, $V_{2,0}$, $V_{3,0}$ задаются внешним управлением и определяют подвижную систему координат, в которой рассматриваются деформации. В отличие от ранее выполненных исследований в (1) входят параметры p_i $i=1,2,...k$, которые изменяются в ходе эволюции. Для раскрытия динамической связи рассматриваются силы, действующие на переднюю $F=F^{(0)}\{\chi_1,\chi_1,\chi_3\}^{\mathrm{T}}$ и задние $\Phi=\{\Phi_1,\Phi_2,\Phi_3\}^{\mathrm{T}}$ грани инструмента (рис. 1). Угловые коэффициенты χ_i удовлетворяют условиям нормировки $(\chi_1)^2+(\chi_2)^2+(\chi_3)^2=1$. Главные свойства динамической связи можно раскрыть, если представить силы $F=F^{(0)}\{\chi_1,\chi_1,\chi_3\}^{\mathrm{T}}$, уравнением [37, 44–46]

$$F=F^{(0)}\{\chi_1,\chi_1,\chi_3\}^{\mathrm{T}}, \quad (2)$$

где

$$T^{(0)}dF^{(0)}/dt+F^{(0)}=$$

$$=\rho\left\{1+\mu\exp\left[-\zeta(V_{3,0}-dX_3/dt)\right]\right\}\left[t_P^{(0)}-X_1\right]\times$$

$$\times\int_{t-T}^{t}\{V_{2,0}-dX_2/dt\}dt;$$

ρ – давление стружки в [кг/мм^2]; ζ – параметр крутизны уменьшения сил в [с/мм]; μ – безразмерный коэффициент; $T^{(0)}$ – параметр, определяющий запаздывание сил. Для сил $\Phi=\{\Phi_1,\Phi_2,\Phi_3\}^{\mathrm{T}}$ [37, 44–46]

$$\begin{cases}\Phi_1=\rho_1\left\{\int_{t-T}^{t}[V_{2,0}-dX_2/dt]dt\right\}\times\\ \times\exp\left[\alpha_1(-dX_1/dt)\right];\\ \Phi_2=\rho_2\left[t_P^{(0)}-X_1(t)\right]\times\\ \times\exp\alpha_2[V_{2,0}-dX_2/dt];\\ \Phi_3=k_{\mathrm{т}}[\Phi_1+\Phi_2],\end{cases} \quad (3)$$

где ρ_1, ρ_2 – силы, приведенные к длине контакта в [кг/мм]; α_1, α_2 – коэффициенты крутизны нарастания сил; $k_{\mathrm{т}}$ – постоянный коэффициент трения.

Следующим этапом знаний о динамической системе резания является раскрытие влияния динамики и эволюции динамической системы на выходные свойства процесса резания, оцениваемые интенсивностью изнашивания инструмента и геометрической топологией формируемой резанием поверхности. Этот тезис определяет **цель исследований,** рассмотренных в статье. Для достижения этой цели ставятся и **решаются следующие задачи**:

– раскрывается взаимосвязь траектории мощности необратимых преобразований энер-

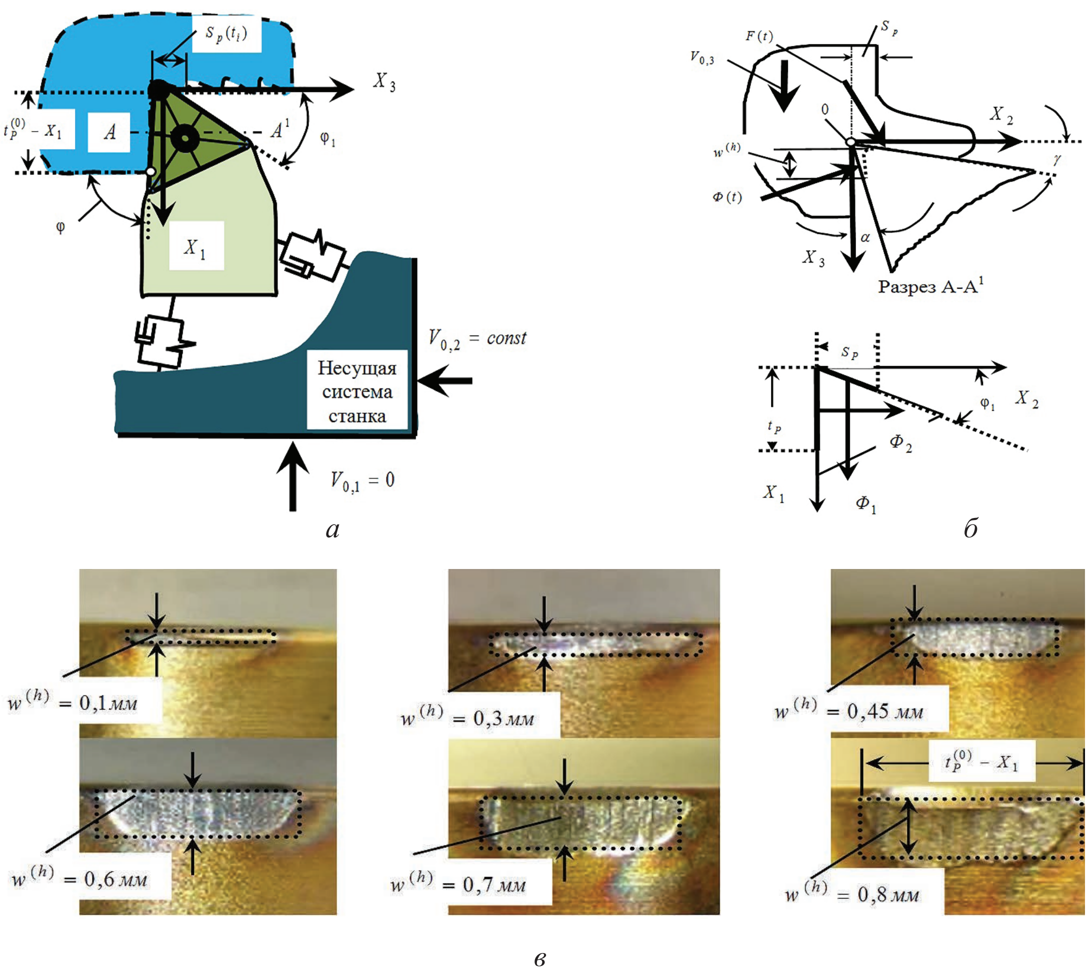

Рис. 1. Схема динамической системы резания:

а – схема динамической модели; *б* – схема сил, действующих на инструмент; *в* – фотографии развития износа по задней грани

Fig. 1. Diagram of dynamic cutting system:

а – dynamic model diagram; *б* – force plan; *в* – pictures of wear evolution along the back

гии в узлах сопряжения граней инструмента с заготовкой и зоной резания со скоростью изнашивания, что позволяет выяснить зависимость изнашивания от эволюционных преобразований динамической системы резания;

– рассматривается изменение формируемых в окрестностях траекторий притягивающих множеств деформационных смещений, которые изменяют геометрическую топологию формируемой резанием поверхности.

Методика исследований

Методика исследований эволюции динамической системы резания

Изучение эволюции динамической системы резания за счет необратимых преобразований энергии в зонах сопряжения граней инструмента с заготовкой и стружкой выполнено на основе методов математического моделирования и параметрической идентификации, а также сравнения полученных на основе моделирования результатов с экспериментами. Эволюция – это изменения свойств резания в зависимости от необратимых преобразований энергии. Это внутренняя перестройка, всегда существующая при резании. Для ее моделирования примем две гипотезы. **Первая** – параметры p_i, $i = 1, 2, \dots k$ изменяются по мере развития износа инструмента. Таким образом,

$$p_i = p_{i,0} + \Delta p_i \left(w^{(h)}\right), \tag{4}$$

где $p_{i,0}$ – начальное значение параметра; $\Delta p_i \left(w^{(h)}\right)$ – его приращение при увеличении износа $w^{(h)}$ по задней грани. **Вторая** – скорость изнашивания $v^{(w)} = dw^{(h)} / dt$ определяется мощностью необратимых преобразований энергии $N(t)$ в области ее сопряжения с заготовкой и ее предысторией.

Ограничимся износом $w^{(h)}$ в виде средней его величины. Тогда $v^{(w)}$ [51]

$$v^{(w)}(t) = \beta_1 \left\{ N(t) + \beta_2 \int_0^t W(t-\xi) N(\xi)\, d\xi \right\}, \quad (5)$$

где β_1 – коэффициент в [кг$^{-1}$]; β_2 – коэффициент размерности [с$^{-1}$]; $W(t - \varsigma)$ – безразмерное ядро интегрального оператора. При оценивании эволюции рассматривается мощность, приведенная к единице длины контакта, в нашем случае – к глубине резания. Ядро интегрального оператора учитывает два конкурирующих процесса адаптации и деградации свойств контактируемых тел. Оно равно

$$W(t-\xi) = \left\{ -\exp\left[-\frac{1}{T_1}(t-\xi) \right] + \right.$$
$$\left. + \mu_v \exp\left[-\frac{1}{T_2}(t-\xi) \right] \right\}, \quad (6)$$

где $T_1 = T_1^{(L)} / V_3$, $T_2 = T_2^{(L)} / V_3$ – отнесенные к скорости резания параметры, имеющие размерность [с]. Параметры T_1, T_1, μ_v, β_1, β_2 интегральных уравнений и их связь с износом определяются на основе методов экспериментальной динамики. Обнаружено, что в неизменных условиях при варьировании скорости резания параметры $T_1^{(L)}$ и $T_2^{(L)}$ остаются неизменными и имеют размерность [мм]. Если известно $v^{(w)}$, то

$$w^{(h)}(t) = \int_0^t v^{(w)}(\xi) d\xi. \quad (7)$$

В дальнейшем удобно рассматривать усредненные по T значения мощности $N(t)$, представленной последовательностью $N(t) = \{N_1, N_2, \ldots N_n\}$:

$$\begin{cases} \int_0^t \left[\exp\left(-\frac{t-\xi}{T_1} \right) \right] N(\xi)\, d\xi \approx T_1 \left[\exp\left(-\frac{nT}{T_1} \right) \right] \times \\ \times \left[\exp\left(\frac{T}{T_1} \right) - 1 \right] \sum_{i=0}^{i=n} \left\{ N_i \exp\left(\frac{(i-1)T}{T_1} \right) \right\}, \\ \int_0^t \left[\exp\left(-\frac{t-\xi}{T_2} \right) \right] N(\xi) d\xi \approx T_2 \left[\exp\left(-\frac{nT}{T_2} \right) \right] \times \\ \times \left[\exp\left(\frac{T}{T_2} \right) - 1 \right] \sum_{i=0}^{i=n} \left\{ N_i \exp\left(\frac{(i-1)T}{T_2} \right) \right\}, \end{cases} \quad (8)$$

где t разбито на n отрезков длиной T, т. е. $t = nT$, $n = 1, 2, 3, \ldots$. В уравнениях (8) усредненное на отрезке T значение мощности вычисляется по правилу

$$N_i = \frac{1}{T} \int_{t_i - T}^{t_i} \left\{ \widehat{\Phi}_1(t) \frac{dX_1}{dt} + \widehat{\Phi}_2(t) \left[V_{2,0} - \frac{dX_2}{dt} \right] + \right.$$
$$\left. + k_{\text{т}} \left[\widehat{\Phi}_1(t) + \widehat{\Phi}_2(t) \right] \left[V_3 - \frac{dX_3}{dt} \right] \right\} dt. \quad (9)$$

В выражении (9) функции $\widehat{\Phi}_1(t)$ и $\widehat{\Phi}_2(t)$ в отличие от системы (3) рассматриваются как отнесенные к глубине резания. При анализе мощности N_i необходимо учитывать, что dX_i / dt, $i = 1, 2, 3$ являются периодическими функциями времени, и силы $\widehat{\Phi}_i(t)$, $i = 1, 2$ непропорционально возрастают при движении инструмента в сторону детали и они практически равны нулю при реверсировании движения (рис. 2). Выражение (8) положено в основу вычисления (5). Учтем также зависимость $T^{(0)}$ от режимов с учетом деформационных смещений [10]. Тогда

$$T^{(0)}(S, V_{0,3}) = \frac{kS_p(t) t_p(t)}{V_{3,\Sigma}(t)}, \quad (10)$$

где $S_p(t) = \int_{t-T}^{t} \{V_{2,0} - dX_2 / dt\} dt$; $t_P(t) = t_P^0 - X_1(t)$;

k – коэффициент, в [мм$^{-1}$]; $V_{3,\Sigma}(t) = V_{3,0} - dX_3 / dt$. Система, описываемая уравнениями (1)–(3), (10), позволяет выяснить эволюцию динамических свойств резания при варьировании начальных параметров и режимов в единстве устойчивости и формируемых притягивающих множеств деформаций и их бифуркаций в ходе эволюции.

Результаты и их обсуждение

Результаты изучения связи эволюции с изнашиваемостью инструмента

Влияние эволюционных преобразований в динамической системе резания на изнашивание инструмента проиллюстрируем на примере продольного точения недеформируемой детали с постоянными режимами и припуском. Рассмотрены эволюционные диаграммы при различных значениях жесткости c, скоростных коэффициентов h, припуска $t_P^{(0)}$ и скорости $V_{3,0}$ (рис. 3 и 4) на примере продольного точения

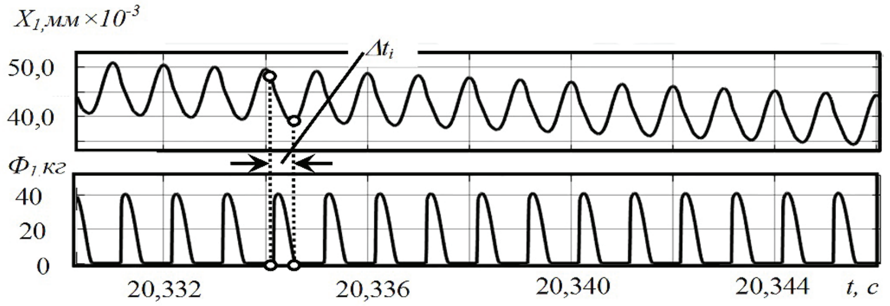

Рис. 2. Пример траектории деформационных смещений в направлении X_1 и соответствующих им сил Φ_1. Фрагмент Δt_i соответствует движению инструмента в сторону заготовки

Fig. 2. An example of the trajectory of deformation displacements in the direction X_1 and the forces Φ_1 corresponding to it. The fragment Δt_i corresponds to the movement of the tool towards the workpiece

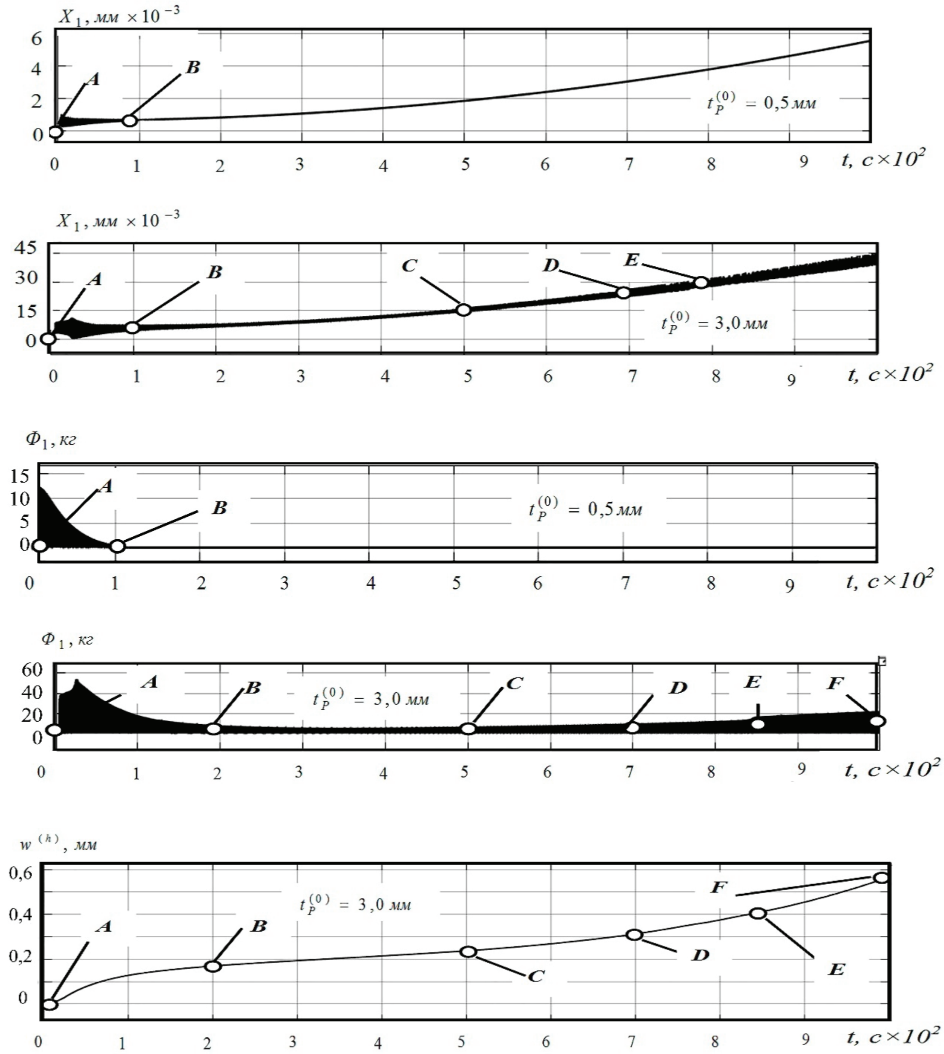

Рис. 3. Пример эволюционных изменений траектории деформационных смещений в направлении X_1 и соответствующих сил F_1, действующих на заднюю грань, а также износа $w^{(h)}$

Fig. 3. An example of evolutionary changes in the trajectory of deformation displacements in the direction X_1 and corresponding forces F_1 acting on the back, as well as wear $w^{(h)}$

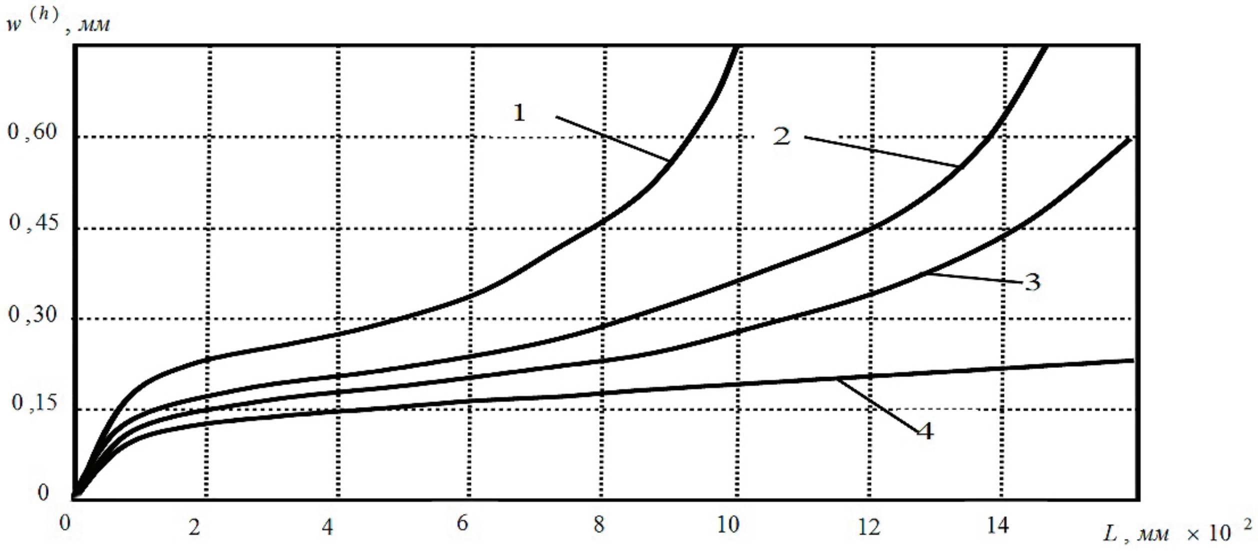

Рис. 4. Примеры изменение износа по пути резания:

1 – $t_P^{(0)}$ = 3,0 мм, $V_{3,0}$ = 80,0 м/мин, $c = c_0$, $h = h_0$; *2* – $t_P^{(0)}$ = 3,0 мм, $V_{3,0}$ = 80,0 м/мин, $c = 2c_0$, $h = h_0$;
3 – $t_P^{(0)}$ = 3,0 мм, $V_{3,0}$ = 80,0 м/мин, $c = 2c_0$, $h = 2h_0$; *4* – $t_P^{(0)}$ = 0,5 мм, $V_{3,0}$ = 80,0 м/мин, $c = c_0$, $h = h_0$

Fig. 4. Examples of changes in wear along the cutting path:

1 – $t_P^{(0)}$ = 3.0 mm, $V_{3.0}$ = 80.0 m/min, $c = c_0$, $h = h_0$; *2* – $t_P^{(0)}$ = 3.0 mm, $V_{3.0}$ = 80.0 m/min, $c = 2c_0$, $h = h_0$;
3 – $t_P^{(0)}$ = 3.0 mm, $V_{3.0}$ = 80.0 m/min, $c = 2c_0$, $h = 2h_0$; *4* – $t_P^{(0)}$ = 0.5 mm, $V_{3.0}$ = 80.0 m/min, $c = c_0$, $h = h_0$

Таблица 1

Table 1

Параметры подсистемы инструмента

The subsystem parameters of cutting tool

$h_{1,1}$, кг · с/мм	$h_{2,2}$, кг · с/мм	$h_{3,3}$, кг · с/мм	$h_{1,2} = h_{2,1}$, кг · с/мм	$h_{1,3} = h_{3,1}$, кг · с/мм	$h_{2,3} = h_{3,2}$, кг · с/мм
0,25	0,15	0,15	0,1	0,08	0,08
$c_{1,1}$, кг/мм	$c_{2,2}$, кг/мм	$c_{3,3}$, кг/мм	$c_{1,2} = c_{2,1}$, кг/мм	$c_{1,3} = c_{3,1}$, кг/мм	$c_{2,3} = c_{3,2}$, кг/мм
1000	800	800	800	800	800

Таблица 2

Table 2

Начальные параметры модели

The initial model parameters

ρ, кг/мм^2	$\alpha_1 = \alpha_2$, с/мм	ς, с/мм	μ	k, мм$^{-1}$	$\rho_1 = \rho_2$, с/мм	$k_т$
500	20	0,2	0,5	1,2	0,5	0,2

Таблица 3
Table 3

Параметры операторов
The operators' parameters

β_1, кг$^{-1}$	β_2, с$^{-1}$	μ_v	$T_1^{(L)}$, мм	$T_2^{(L)}$, мм
$0{,}2 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	0,2	50	200

стали 12Х18Н10Т диаметром 80,0 мм инструментом с трехгранными пластинками TCGT 11 02 04 R-K твердого сплава фирмы SANDVIK COROMANT. Обработка без СОЖ. Углы инструмента $\varphi = 90°$, $\varphi = 30°$, $\gamma = 20°$, $\alpha = 6°$ (см. рис. 1). Технологические режимы: подача 0,1 мм/об; глубина (0,5…3,0) мм; скорость (36,0…160,0) м/мин. В табл.1 приведены параметры подсистемы инструмента ($m = 4 \cdot 10^{-3}$ кг · с^2/мм), а в табл. 2 – начальные параметры модели; в табл. 3 – параметры операторов. Значения матрицы жесткости и скоростных коэффициентов соответственно обозначены: c_0 и h_0. Путь L, пройденный инструментом вдоль оси, отличается от времени на коэффициент V_2. Справедливо: $\underset{t\to\infty}{\widehat{X}_i(t) = \frac{1}{t}\int_0^t X_i(\xi)d\xi} \Rightarrow X_i^*$. Здесь X_i^* – равновесие системы, величина, малая по сравнению с L. Поэтому при определении связи времени и пути величиной X_i^* можно пренебречь.

Вначале рассмотрим эволюционные диаграммы деформаций $X_i, i = 1, 2, 3$ и сил Φ_i, $i = 1, 2, 3$ (рис. 3). В ходе эволюции наблюдаются бифуркации притягивающих множеств деформаций. Их тип и параметры изменяют силы Φ_i, $i = 1, 2, 3$ и, следовательно, мощность N_i (рис. 3). Все диаграммы являются уникальными и они зависят от начальных параметров, например матрицы жесткости и режимов. На диаграммах на начальном этапе (участок «A–B») наблюдается потеря устойчивости и, как правило, образование орбитально асимптотически устойчивого предельного цикла, размах колебаний которого монотонно уменьшается по мере установления стационарного режима. В зависимости от начальных параметров и режимов траектория может стать устойчивой или в ее окрестности образуются притягивающие множества типа предельного цикла («C–D»), инвариантного тора («D–E») или странного аттрактора («E–F»). Траектория износа на рис. 3 вычислена по выражениям (5) и (7). Динамические взаимодействия при резании позволяют объяснить все известные этапы развития износа: приработку, стационарный режим, катастрофическое изнашивание. На диаграмме износа также показаны точки бифуркаций.

Для каждой начальной совокупности параметров и режимов существует уникальная эволюционная траектория, определяющая изнашивание (рис. 4). Как правило, увеличение жесткости матрицы скоростных коэффициентов вызывает увеличение пути, пройденного инструментом до критического износа. На износ влияют и режимы, изменяющие начальные параметры динамической связи. Приведенные данные согласуются с экспериментальными результатами [1, 4], показывающими увеличение стойкости при возрастании жесткости. В [4] экспериментально установлено, что интенсивность износа возрастает при увеличении $t_P^{(0)}$. При этом давление на заднюю грань практически не меняется. Представленные на рис. 3 и 4 данные показывают, что объяснение этому феномену кроется в особенностях эволюции системы и зависимости устойчивости от $t_P^{(0)}$.

Обращает на себя внимание зависимость изнашивания от запаса устойчивости. Принятая модель не учитывает параметрических условий самовозбуждения и внешних возмущений, проанализированных ранее [31, 44–46]. Если их учитывать, то по мере увеличения скорости резания существует диапазон, в котором запас устойчивости максимален. Это связано с двумя механизмами потери устойчивости. В области малых скоростей потеря устойчивости обусловлена запаздывающим аргументом в преобразовании деформаций в силы. В дальнейшем необходимо учитывать параметрическое самовозбуждение, которое проявляется при увеличении частоты вращения шпинделя. Этим можно объяснить и влияние на изнашиваемость диаметра обрабатываемого материала [4].

Результаты изучения эволюции геометрической топологии поверхности

Известно [2, 3, 8], что геометрическая топология определяется траекторией формообразующих движений и геометрией инструмента. На рельеф оказывают влияние и самостоятельные процессы, например, пластическое выдавливание материала из зоны резания, температурные деформации, следы от адгезионных взаимодействий и пр. Мы ограничимся рассмотрением геометрической топологии, определяемой исключительно следом на детали от вершины инструмента. Если задана (вычислена или наблюдаема) функция $X_1(t)$, то

$$R = \begin{bmatrix} X_1(\Delta t) & X_1(2\Delta t) & X_1(3\Delta t) & \dots & X_1(i\Delta t) & \dots & X_1(k\Delta t) \\ X_1[(k+1)\Delta t] & X_1[(k+2)\Delta t] & X_1[(k+3)\Delta t] & \dots & X_1[(k+i)\Delta t] & \dots & X_1[(2k)\Delta t] \\ X_1[(2k+1)\Delta t] & X_1[(2k+2)\Delta t] & X_1[(2k+3)\Delta t] & \dots & X_1[(2k+i)\Delta t] & \dots & X_1[(3k)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1\{[(i-1)k+1]\Delta t\} & X_1\{[(i-1)k+2]\Delta t\} & X_1\{[(i-1)k+3]\Delta t\} & \dots & X_1\{[(i-1)k+i]\Delta t\} & \dots & X_1[(ik)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1\{[(k-1)k+1]\Delta t\} & X_1\{[(k-1)k+2]\Delta t\} & X_1\{[(k-1)k+3]\Delta t\} & \dots & X_1\{[(k-1)k+i]\Delta t\} & \dots & X_1[(kk)\Delta t] \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Здесь временной отрезок T_Σ разбит на k последовательных диапазона, длина которых равна $T = k\Delta t$, т. е. $T_\Sigma = k^2\Delta t$. Приращение Δt определяется частотой Найквиста. Таким образом, в (11) столбцы характеризуют продольный рельеф, а стоки – поперечный. Следовательно, для определения неровностей продольного сечения необходимо из последовательности $X_1(t)$ выбрать значения стробоскопического отображения Пуанкаре с периодом *T*. Можно определить и оценки рельефа по другим направлениям. Не останавливаясь на деталях, рассмотрим изменение геометрической топологии (рис. 5) в ходе эволюции для диаграммы, представленной на рис. 3. Даны примеры для участков «СД», «DE» и «EF». Как видно, в ходе эволюции изменяется геометрическая топология поверхности, возрастает ее неопределенность и размах следа инструмента на детали. Расположение регулярных неровностей в случае предельного цикла зависит от соотношения частот вращения заготовки и формируемых автоколебаний.

Хаотическим колебаниям соответствует хаотическая поверхность. В случае двумерного тора колебания геометрии поверхности содержат две периодические составляющие, и в зависимости от соотношения частот вращения шпинделя и частот, определяющих тор, возможны биения на разностных частотах. Подчеркнем, что приведенные примеры геометрических топологий характеризуют отклонения траекторий вершины инструмента от заданных параметров управления.

Обсуждение результатов

Необратимые преобразования энергии механической системы в областях сопряжений граней инструмента с заготовкой и процессом резания вызывают эволюционные изменения свойств динамической системы. Изменения свойств приводят к вариациям скорости изнашивания и формированию различных притягивающих множеств деформаций, которые влияют на точность и геометрическую топологию поверхности детали. При этом анализируется работа и мощность необратимых преобразований не всей системы резания, а только в области контакта задней грани инструмента с заготовкой. Силы Ф, во-первых, зависят не от смещений, а от их скоростей. Нетрудно показать, что эти силы совместно с силами *F* формируют непотенциальные (циркуляционные) составляющие, которые вызывают прецессионные колебания, и на периодических траекториях этих сил совершается работа. Во-вторых, по отношению к скоростям эта связь не обладает свойством центральной симметрии, поэтому в силах при периодических движениях инструмента относительно заготовки образуется постоянная составляющая, которая не только вызывает дополнительные упругие смещения инструмента, но и изменяет условия

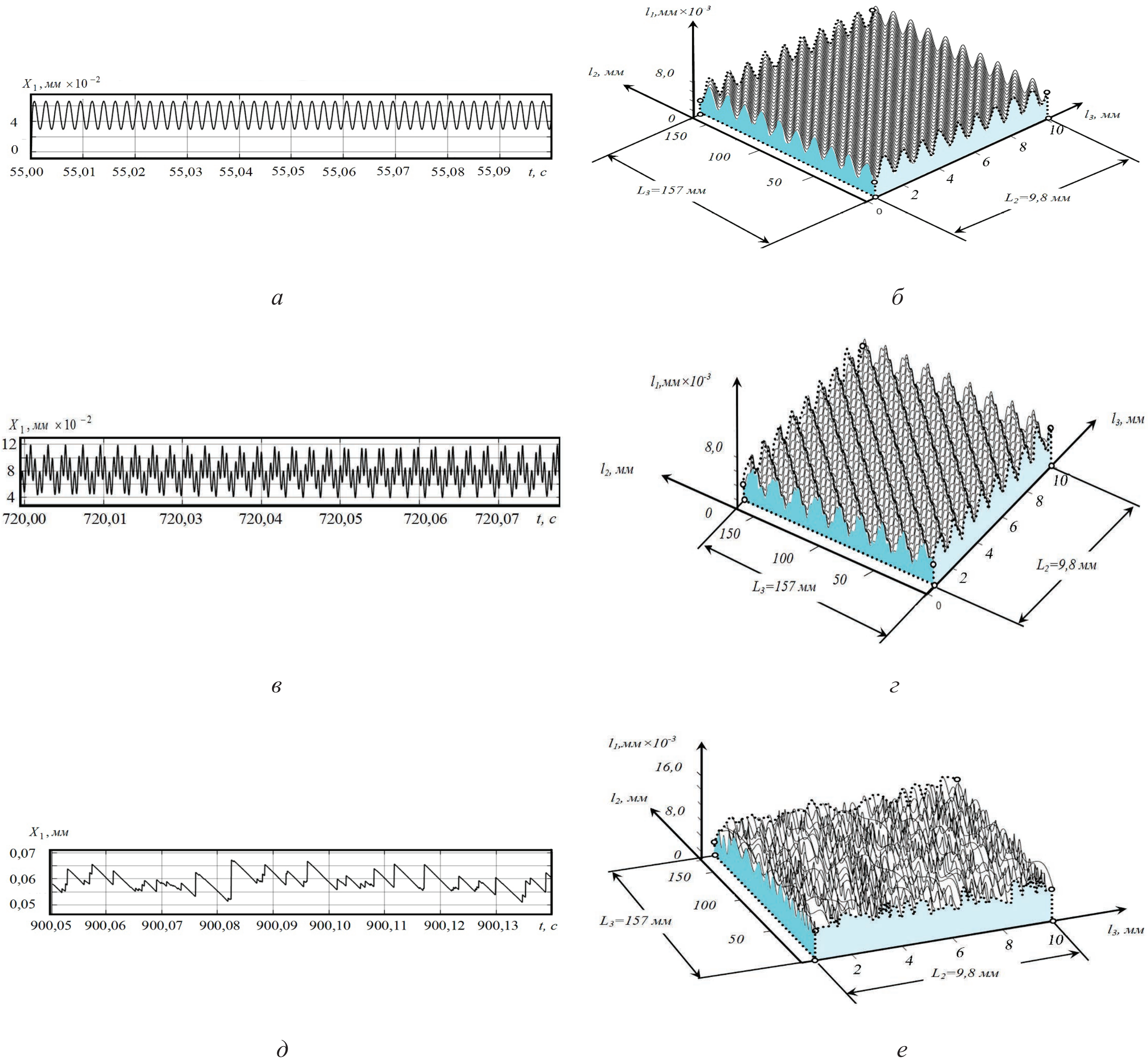

Рис. 5. Изменение геометрической топологии поверхности в ходе эволюции:

а, *в*, *д* – временные траектории, соответствующие участкам «CD», «DE», «EF» (рис. 3); *б*, *г*, *е* – геометрические топологии, соответствующие этим участкам

Fig. 5. Changes in the geometric topology of the surface during evolution:

а, *в*, *д* – time trajectories corresponding to the sections "CD", "DE", "EF" (Fig. 3); *б*, *г*, *е* – geometric topologies corresponding to these sections

сближения задней грани инструмента с заготовкой. В-третьих, за счет контакта задних граней с заготовкой формируемые дополнительные силы обеспечивают эффект скольжения задней грани вдоль некоторой предельной траектории. Это вызывает не только нелинейные искажения, но и смещение формируемых притягивающих множеств деформационных смещений в низкочастотную область, в некоторых случаях образующих хаотические колебания.

Таким образом, процесс резания является типичным примером самоорганизующейся эволюционной динамической системы, в которой имеется постоянный источник поступающей энергии и ее необратимые преобразования. В этой системе наблюдается обмен информацией между подсистемами в виде изменения математического представления динамической связи, объединяющей подсистемы. Процесс резания характеризуется как сложная нелинейная система, отдельные подсистемы в которой являются взаимосвязанными, т. е. она характеризуется свойством эмерджентности. В ней эволюционные изменения и самоорганизация являются естественными, они влияют на выходные свойства процесса, и ее эволюцией можно управлять путем согласования внешнего управления, например от системы ЧПУ с внутренней динамикой.

По мере накопления мощности необратимых преобразований система эволюционирует, что проявляется в бифуркациях притягивающих множеств. Во всех случаях по мере совершения работы нестационарность траекторий возрастает, что проявляется в образовании при критическом изнашивании хаотической динамики. Таким образом, динамическая система резания может рассматриваться как сложная взаимосвязанная система, свойства которой естественным образом меняются и достигают некоторого предельного множества, определяемого параметрами качества формируемых деталей. Так как система обладает свойством эмерджентности, то свойства подсистемы не соответствуют свойствам системы в целом. В частности, при проведении экспериментов, например по изнашиванию инструментов на конкретном станке, переносить полученные результаты на другой станок с другими динамическими характеристиками можно с большой осторожностью.

Выводы

Процесс обработки резанием на металлорежущих станках представляет сложную нелинейную самоорганизующуюся и эволюционно изменяющуюся динамическую систему. Самоорганизация обусловлена мощностью необратимых преобразований энергии, подводимой к процессу резания. В результате система сама без внешнего воздействия изменяет свои свойства в единстве изнашивания инструмента и изменения формируемой резанием геометрической топологии поверхности детали. Изменение выходных характеристик процесса резания обусловлено варьированием параметров формируемой резанием динамической связи, которые зависят от траектории мощности необратимых преобразований энергии в зоне резания и одновременно влияют на траекторию мощности по произведенной работе. Поэтому, например, каждая траектория развития износа во времени является уникальной, так как зависит от множества бифуркаций динамической системы резания в ходе эволюции. Уникальным является и изменение геометрической топологии формируемой резанием поверхности.

В связи с этим для повышения эффективности обработки на металлорежущих станках, в том числе управляемых от системы ЧПУ, необходимо согласовать внешнее управление (например программу ЧПУ) с внутренней динамикой, стимулирующей не только внутренние взаимодействия, но и эволюцию системы. Причем внешнее управление понимается в широком смысле не только как управление траекториями исполнительных элементов станка, но и как согласование с внутренней динамикой системы доступных изменению параметров системы.

Список литературы

1. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2019. – 289 с. – ISBN 978-5-7890-1669-5.

2. *Безъязычный В.Ф., Фоменко В.В., Непомилуев В.В.* Исследование влияния технологических условий обработки точением режущим инструментом с износостойкими покрытиями на параметры качества поверхностного слоя деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 19, № 3. – С. 108–113.

3. *Васин С.А.* Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 447 с. – ISBN 5-7038-1823-0.

4. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

5. *Зорев Н.Н.* Влияние природы износа режущего инструмента на зависимость его стойкости от скорости резания // Вестник машиностроения. – 1965. – № 2. – С. 68–76.

6. *Козочкин М.П., Алленов Д.Г.* Исследование влияния износа режущей кромки инструмента на деформации поверхностного слоя детали // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 4 (35). – С. 22–29.

7. *Постнов В.В., Шафиков А.А.* Разработка эволюционной модели изнашивания режущего инструмента для управления процессом обработки //

Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 139–145.

8. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

9. *Hahn R.S.* On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation // Transactions of American Society of Mechanical Engineers. – 1954. – Vol. 76. – P. 593–597.

10. *Кудинов В.А.* Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

11. *Tlusty I., Ismail F.* Basic non-linearity in Machining Chatter // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1981. – Vol. 30. – P. 299–304. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.

12. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1987. – 184 с.

13. Chaotic vibrations in regenerative cutting process / J. Warminski, G. Litak, J. Lipski, M. Wiercigroch, M.P. Cartmell // IUTAM/IFToMM Symposium on Synthesis of Nonlinear Dynamical Systems. – Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. – P. 275–284.

14. *Городецкий Ю.И.* Теория нелинейных колебаний и динамика станков // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2001. – № 2. – С. 69–88.

15. *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.

16. *Stepan G., Szalai R. Insperger T.* Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect // Nonlinear Dynamics of Production Systems. – Weinheim: Wiley-VCH, 2004. – P. 111–127.

17. *Wiercigroch M., Budak E.* Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 663–693. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.

18. *Wiercigroch M., Krivtsov A.M.* Frictional chatter in orthogonal metal cutting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 713–738. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0752.

19. *Litak G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // Chaos, Solitons and Fractals. – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

20. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gouskov, 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.

21. *Wang X., Feng C.X.* Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 20 (5). – P. 348–356. – DOI: 10.1007/s001700200162.

22. Surface quality of a work material's influence on the vibrations of the cutting process / J. Lipski, G. Litak, R. Rusinek, K. Szabelski, A. Teter, J. Warminski, K. Zaleski // Journal of Sound and Vibration. – 2002. – Vol. 252. – P. 729–737. – DOI: 10.1006/jsvi.2001.3943.

23. Calculation of the specific cutting coefficients and geometrical aspects in sculptured surface machining / A. Lamikiz, L.N. Lopez de Lacalle, J.A. Sanchez, U. Bravo // Machining Science and Technology. – 2005. – Vol. 9 (3). – P. 411–436. – DOI: 10.1080/15321790500226614.

24. *Namachchivaya N.S., Beddini R.* Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter // Journal of Nonlinear Science. – 2003. – Vol. 13. – P. 265–288.

25. *Stepan G., Szalai R. Insperger T.* Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect // Nonlinear Dynamics of Production Systems. – Weinheim: Wiley-VCH, 2004. – P. 111–127.

26. Influence of the ploughing effect on the dynamic behaviour of the self-vibratory drilling head / H. Paris, D. Brissaud, A. Gouskov, N. Guibert, J. Rech // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57. – P. 385–388. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.101.

27. *Wahi P., Chatterjee A.* Self-interrupted regenerative metal cutting in turning // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2008. – Vol. 43. – P. 111–123. – DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2007.10.010.

28. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool / H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45 (8). – P. 1050–1066. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

29. On the global dynamics of chatter in the orthogonal cutting model / Z. Dombovari, D.A.W. Barton, R.E. Wilson, G. Stepan // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2011. – Vol. 46. – P. 330–338. – DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2010.09.016.

30. *Litak G., Rusinek R.* Dynamics of a stainless steel turning process by statistical and recurrence analyses // Meccanica. – 2012. – Vol. 47 (6). – P. 1517–1526. – DOI: 10.1007/s11012-011-9534-x.

31. *Заковоротный В.Л., Фам Т.Х.* Параметрическое самовозбуждение динамической системы резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2013. – Т. 13, № 5–6 (74). – С. 97–103. – DOI: 10.12737/1286.

32. Analysis of indirect measurement of cutting forces turning metal cylindrical shells / K. Kondratenko, A. Gouskov, M. Guskov, Ph. Lorong, G. Panovko // Vibra-

tion Engineering and Technology of Machinery. – Cham: Springer, 2014. – P. 929–937. – DOI: 10.1007/978-3-319-09918-7_82.

33. *Заковоротный В.Л.* Нелинейная трибомеханика. – Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2000. – 293 с. – ISBN 5-7890-0134-3.

34. *Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P.* Influence of tool flank forces on complex dynamics of cutting process // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2014. – Vol. 24, N 9. – P. 1450115. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.

35. *Weremczuk A, Rusinek R.* Influence of frictional mechanism on chatter vibrations in the cutting process – analytical approach // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 89. – P. 2837–2844. – DOI: 10.1007/s00170-016-9520-5.

36. *Воронов С.А., Иванов И.И., Киселев И.А.* Исследования процесса фрезерования на основе редуцированной динамической модели // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 1. – С. 62–71.

37. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotnyi, 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. *Reith M.J., Bachrathy D., Stepan G.* Improving the stability of multi-cutter turning with detuned dynamics // Machining Science and Technology. – 2016. – Vol. 20 (3). – P. 440–459. – DOI: 10.1080/10910344.2016.1191029.

39. *Azvar M., Budak E.* Multi-dimensional modelling of chatter stability in parallel turning operation // Proceedings of the 17th International Conference on Machine Design and Production UMTIK 2016, Bursa, Turkiye, July 12–15. – Bursa, 2016.

40. Analytical approach of turning thin-walled tubular parts. Stability analysis of regenerative chatter / A. Gerasimenko, M. Guskov, A. Gouskov, P. Lorong, G. Panovko // Vibroengineering Procedia. – 2016. – Vol. 8. – P. 179–184.

41. Influence of the clearance face on the condition of chatter self-excitation during turning / A. Gouskov, M. Gouskov, Ph. Lorong, G. Panovko // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2017. – Vol. 19 (1). – P. 17–39.

42. *Воронов С.А., Киселев И.А.* Нелинейные задачи динамики процессов резания // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 2 (51). – С. 9–23.

43. *Заковоротный В.Л., Санкар Т., Бордачев Е.В.* Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра // СТИН. – 1994. – № 12. – С. 22–25.

44. *Zakovorotny V.L., Gvindjilia V.E.* Influence of kinematic perturbations on shape-generating movement trajectory stability // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 157–162. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.453.

45. *Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E.* Influence of spindle wobble in a lathe on the tool's deformational-displacement trajectory // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, N 8. – P. 623–631. – DOI: 10.3103/S1068798X1808018X.

46. *Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E.* Dynamic influence of spindle wobble in a lathe on the workpiece geometry // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, N 9. – P. 723–725. – DOI: 10.3103/S1068798X18090307.

47. *Khamel S., Ouelaa N., Bouacha K.* Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool // *Journal of Mechanical Sciences and Technology.* – 2012. – Vol. 26 (11). – P. 3605–3616. – DOI: 10.1007/s12206-012-0853-1.

48. *Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D.* The problems of control of the evolution of the dynamic system interacting with the medium // International Journal of Mechanical Engineering and Automation. – 2014. – Vol. 1, N 5. – P. 271–285.

49. *Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E.* Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39, N 5. – P. 423–430. – DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

50. *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.

51. *Мышкис А.Д.* Математика для втузов: специальные курсы. – М.: Наука, 1971. – 640 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2019 vol. 21 no. 4 pp. 31–46
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

The Dependence of Tool Wear and Quality Parameters of the Surface being Cut on Dynamic Characteristics

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: 19 September 2019
Revised: 15 October 2019
Accepted: 15 November 2019
Available online: 15 December 2019

Keywords:
Dynamic turning system
Wear speed
Surface quality

Funding
The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-08-00022.

ABSTRACT

Introduction. It is known that the wear and quality of the parts surface change during the cutting process. These changes depend on the dynamic cutting system. Studies are also known in the field of the dynamics of the cutting process, in which stability problems of various attractive sets of deformation displacements formed in the vicinity of the trajectories are considered. The bifurcations of attracting sets are analyzed, including those associated with the release of energy in the cutting zone. However, a study of the relationship between the evolutionary restructuring of the system and the output properties of the cutting process in the unity of the wear rate of the tools and the geometric surface topology formed by cutting is not performed. The provisions of evolutionary transformations of a dynamic cutting system for the case of analysis of the output characteristics of the cutting process are developed in the paper. **The purpose of research** is to disclose the relationship of the evolutionary adjustment of the dynamic cutting system with the tool wear resistance and a change in the geometric topology of the surface formed by cutting to ensure the required output processing characteristics. A method **is proposed**, and the results of studying changes in the wear rate, the amount of wear, and changes in the geometric topology of the surface formed by cutting depending on the initial technological conditions and the dynamic parameters of the system during evolutionary adjustment **are presented**. The **research methods** are: mathematical simulation of evolutionary transformations based on the representation of the dependence of the dynamic coupling parameters formed by the cutting process, in the form of its dependence on the power path of irreversible transformations at the interface nodes of the tool faces with the workpiece and the cutting zone. In this case, the conversion of power into the tool wear rate and the change in the geometric surface topology are considered. **Results and discussion**. Dependences of wear and surface geometry on the evolutionarily changing properties of a dynamic cutting system are disclosed. The task is to coordinate the designed trajectories with the internal evolutionally changing dynamics of the system to increase processing efficiency. The research results are promising especially for processing parts with complex geometric profiles, as well as parts whose stiffness matrices vary along the tool path.

For citation: *Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E.* 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. (In Russian).

References

1. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoi obrabotke* [Synergetics of wear of tool materials at blade processing]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 978-5-7890-1669-5.

2. Bez"yazychnyi V.F., Fomenko V.V., Nepomiluev V.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh uslovii obrabotki tocheniem rezhushchim instrumentom s iznosostoikimi pokrytiyami na parametry kachestva poverkhnostnogo sloya detalei mashin [Investigation of influence of technological conditions of machining turning cutting tool with wear-resistant coatings on quality parameters of surface layer of machine parts]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 108–113.

*** 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. Vasin S.A. *Rezanie materialov: termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosvyazei pri rezanii* [Cutting materials: thermomechanical approach to the system of relationships in cutting]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 447 p. ISBN 5-7038-1823-0.

4. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

5. Zorev N.N. Vliyanie prirody iznosa rezhushchego instrumenta na zavisimost' ego stoikosti ot skorosti rezaniya [Influence of the nature of wear of the cutting tool on the dependence of its resistance on the cutting speed]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1965, no. 2, pp. 68–76.

6. Kozochkin M.P., Allenov D.G. Issledovanie vliyaniya iznosa rezhushchei kromki instrumenta na deformatsii poverkhnostnogo sloya detali [Study of the influence of wear of tool cutting edges on the deformation of the surface layer details]. *Vestnik MGTU "Stankin" = Vestnik MSTU "Stankin"*, 2015, no. 4 (35), pp. 22–29.

7. Postnov V.V., Shafikov A.A. Razrabotka evolyutsionnoi modeli iznashivaniya rezhushchego instrumenta dlya upravleniya protsessom obrabotki [Development of evolutionary model of wear of the cutting tool for management of process of processing]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik UGATU*, 2008, vol. 11, no. 2, pp. 139–145.

8. Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p.

9. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation. *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 1954, vol. 76, pp. 356–260.

10. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.

11. Tlusty I., Ismail F. Basic non-linearity in machining chatter. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1981, pp. 299–304. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.

12. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviinym instrumentom* [Vibration when machining the edge tool]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 184 p.

13. Warminski J., Litak G., Lipski J., Wiercigroch M. Cartmell M.P. Chaotic vibrations in regenerative cutting process. *IUTAM/IFToMM Symposium on Synthesis of Nonlinear Dynamical Systems*. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 275–284.

14. Gorodetsky Yu.I. Teoriya nelineinykh kolebanii i dinamika stankov [Theory of nonlinear oscillations and machine tool dynamics]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Matematicheskoe modelirovanie i optimal'noe upravlenie = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Mathematical Modeling and Optimal Control*, 2001, no. 2, pp. 69–88.

15. 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.

16. Stepan G., Szalai R. Insperger T. Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect. *Nonlinear Dynamics of Production Systems*, Weinheim, Wiley-VCH, 2004, pp. 111–127.

17. Wiercigroch M., Budak E. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 663–693. DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.

18. Wiercigroch M., Krivtsov A.M. Frictional chatter in orthogonal metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 713–738. DOI: 10.1098/rsta.2000.0752.

19. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2002, vol. 13, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

20. Gouskov 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.

21. Wang X., Feng C.X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, vol. 20 (5), pp. 348–356. DOI: 10.1007/s001700200162.

22. Lipski J., Litak G., Rusinek R., Szabelski K., Teter A., Warminski J., Zaleski K. Surface quality of a work material's influence on the vibrations of the cutting process. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, vol. 252, pp. 729–737. DOI: 10.1006/jsvi.2001.3943.

23. Lamikiz A., Lopez de Lacalle L.N, Sanchez J.A., Bravo U. Calculation of the specific cutting coefficients and geometrical aspects in sculptured surface machining. *Machining Science and Technology*, 2005, vol. 9 (3), pp. 411–436. DOI: 10.1080/15321790500226614.

24. Namachchivaya N.S., Beddini R. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Nonlinear Science*, 2003, vol. 13, pp. 265–288.

25. Stepan G., Szalai R. Insperger T. Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect. *Nonlinear Dynamics of Production Systems*, Weinheim, Wiley-VCH, 2004, pp. 111–127.

26. Paris H., Brissaud D., Gouskov A., Guibert N., Rech J. Influence of the ploughing effect on the dynamic behaviour of the self-vibratory drilling head. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, pp. 385–388. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.101.

27. Wahi P., Chatterjee A. Self-interrupted regenerative metal cutting in turning. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2008, vol. 43, pp. 111–123. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2007.10.010.

28. Moradi H., Bakhtiari-Nejad F., Movahhedy M.R., Ahmadian M.T. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, vol. 45 (8), pp. 1050–1066. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

29. Dombovari Z., Barton D.A.W., Wilson R.E., Stepan G. On the global dynamics of chatter in the orthogonal cutting model. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2011, vol. 46, pp. 330–338. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2010.09.016.

30. Litak G., Rusinek R. Dynamics of a stainless steel turning process by statistical and recurrence analyses. *Meccanica*, 2012, vol. 47 (6), pp. 1517–1526. DOI: 10.1007/s11012-011-9534-x.

31. Zakovorotnyi V.L., Fam T.H. Parametricheskoe samovozbuzhdenie dinamicheskoi sistemy rezaniya [Parametric self-excitation of cutting dynamic system]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2013, vol. 13, no. 5–6 (74), pp. 97–103. DOI: 10.12737/1286.

32. Kondratenko K., Gouskov A., Guskov M., Lorong Ph., Panovko G. Analysis of indirect measurement of cutting forces turning metal cylindrical shells. *Vibration Engineering and Technology of Machinery*. Cham, Springer, 2014, pp. 929–937. DOI: 10.1007/978-3-319-09918-7_82.

33. Zakovorotnyi V.L. *Nelineinaya tribomekhanika* [Nonlinear tribomechanical]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2000. 293 p. ISBN 5-7890-0134-3.

34. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of cutting process. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, vol. 24, no. 9, p. 1450115. DOI: 10.1142/S0218127414501156.

35. Weremczuk A, Rusinek R. Influence of frictional mechanism on chatter vibrations in the cutting process – analytical approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 89, pp. 2837–2844. DOI: 10.1007/s00170-016-9520-5.

36. Voronov S.A., Ivanov I.I., Kiselev I.A. Issledovaniya protsessa frezerovaniya na osnove redutsirovannoi dinamicheskoi modeli [Investigation of the milling process based on a reduced dynamic model of cutting tool]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, no. 1, pp. 62–71. (In Russian).

37. Zakovorotnyi V.L., Lukyanov A.D., Gubanova 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. Reith M.J., Bachrathy D., Stepan G. Improving the stability of multi-cutter turning with detuned dynamics. *Machining Science and Technology*, 2016, vol. 20 (3), pp. 440–459. DOI: 10.1080/10910344.2016.1191029.

39. Azvar M., Budak E. Multi-dimensional modeling of chatter stability in parallel turning operation. *Proceedings of the 17th International Conference on Machine Design and Production*, *UMTIK 2016*, Bursa, Turkiye, July 12–15, 2016.

40. Gerasimenko A., Guskov M., Gouskov A., Lorong P., Panovko G. Analytical approach of turning thin-walled tubular parts. Stability analysis of regenerative chatter. *Vibroengineering Procedia*, 2016, vol. 8, pp. 179–184.

41. Gouskov A., Gouskov M., Lorong Ph., Panovko G. Influence of the clearance face on the condition of chatter self-excitation during turning. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2017, vol. 19 (1), pp. 17–39.

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

43. Zakovorotnyi V.L., Sankar T., Bordachev E.V. Sistema optimal'nogo upravleniya protsessom glubokogo sverleniya otverstii malogo diametra [The optimal control System by the process of deep hole drilling of small diameter]. *STIN = Russian Engineering Research*, 1994, no. 12, pp. 22–25. (In Russian).

44. Zakovorotny V.L., Gvindjilia V.E. Influence of kinematic perturbations on shape-generating movement trajectory stability. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 157–162. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.453.

45. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Influence of spindle wobble in a lathe on the tool's deformational-displacement trajectory. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 8, pp. 623–631. DOI: 10.3103/S1068798X1808018X.

46. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Dynamic influence of spindle wobble in a lathe on the workpiece geometry. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 723–725. DOI: 10.3103/S1068798X18090307.

47. Khamel S., Ouelaa N., Bouacha K. Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool. *Journal of Mechanical Sciences and Technology*, 2012, vol. 26 (11), pp. 3605–3616. DOI: 10.1007/s12206-012-0853-1.

48. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D. The problems of control of the evolution of the dynamic system interacting with the medium. *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 271–285.

49. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 5, pp. 423–430. DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

50. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Bifurkatsii prityagivayushchikh mnozhestv deformatsionnykh smeshchenii rezhushchego instrumenta v khode evolyutsii svoistv protsessa obrabotki [Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Prikladnaya nelinejnaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 20–38. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.

51. Myshkis A.D. *Matematika dlya vtuzov: spetsial'nye kursy* [Mathematics. Special course]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 640 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 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/).