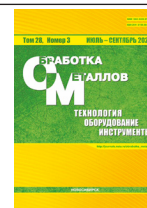




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Зависимость изнашиваемости инструментов от эволюционных изменений параметров динамической системы резания

Валерия Гвинджилия^{а, *}, Вилор Заковоротный^б

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

^а  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  vvgvindjiliya@donstu.ru; ^б  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  vzakovorotny@dstu.edu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06

История статьи:

Поступила: 01 августа 2025

Рецензирование: 02 сентября 2025

Принята к печати: 27 июня 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

Эволюционные преобразования

Динамическая система резания

Износ инструмента

Необратимые преобразования энергии

Финансирование

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZNE-2025-0008).

АННОТАЦИЯ

Введение. Фундаментальным свойством динамической системы резания (ДСР) является ее эволюционное изменение, обусловленное необратимыми преобразованиями энергии в зоне обработки. В них развитие износа инструмента выступает в качестве одного из факторов, влияющих на эволюцию и одновременно зависящих от состояния ДСР. Следовательно, изнашивание зависит от параметров ДСР, и развитие износа изменяет параметры формируемой резанием динамической связи. В этой взаимосвязанной и, следовательно, самоорганизующейся системе интенсивность изнашивания становится зависящей от исходных параметров ДСР, а траектория износа становится зависящей от исходных параметров системы. Однако до настоящего времени не выполнено рассмотрение износа как части взаимосвязанной совокупности подсистем. **Предмет.** Рассматривается изнашиваемость инструмента как неотъемлемой части эволюционно изменяющейся ДСР, обладающей свойством взаимовлияния ее координат и износа. В частности, изучаются закономерности изменения траекторий износа от начальных параметров ДСР. **Цель работы** – изучить влияние необратимых преобразований энергии на изнашиваемость инструмента для его согласования с параметрами ДСР. **Метод и методология.** В статье приводятся результаты математического моделирования эволюционного изменения свойств ДСР, обусловленные фазовой траекторией мощности необратимых преобразований энергии по произведенной работе. Рассматривается модель ДСР, в которой износ выражается с помощью уравнения Вольтерры, проблемы параметризации уравнений, результаты цифрового моделирования и практический пример. **Результаты и обсуждения.** Обсуждаются результаты моделирования связи изнашивания с параметрами ДСР, а также с параметрами управления, которыми являются технологические режимы. Приводится пример изменения эволюции износа при точении стали 10ГН2МФА. Доказывается, что эволюционные свойства износа могут обладать высокой чувствительностью к малым вариациям начальных параметров ДСР, возмущений и управляющих параметров. Рассматривается проблема выбора оптимальной траектории скорости резания по совершенной работе сил, а также использование разработанного математического инструментария для создания цифрового двойника обработки.

Для цитирования: Гвинджилия В.Е., Заковоротный В.Л. Зависимость изнашиваемости инструментов от эволюционных изменений параметров динамической системы резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 147–166. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-147-166.

Введение

Изучению динамики процесса резания (ДПР) посвящены многочисленные исследования, включающие в себя анализ устойчивости траекторий движения инструмента [1–7]. При этом рассматриваются различные механизмы потери устойчивости: регенеративное самовозбуждение [1, 2], в том числе предложен упрощенный

критерий потери устойчивости [3]; самовозбуждение связывается с запаздыванием вариаций сил, обусловленных изменениями деформаций [4–6]. Показано, что при потере устойчивости за счет введенных в модель нелинейных связей наблюдается формирование притягивающих множеств деформаций типа предельного цикла в случае регенеративного самовозбуждения [7, 8] и хаотических аттракторов [9, 10]. Изучение автоколебаний [11–13] и условий образования хаотических аттракторов [14, 15] выполнено и при потере устойчивости равновесия за счет запаздывания сил по отношению к деформациям. Рассмотрены проблемы формирования ав-

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Енвериевна, к.т.н., доцент

Донской государственный технический университет,

пл. Гагарина, 1

344000, г. Ростов-на-Дону, Россия

Тел.: +7 918 583-23-33, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

токолебаний за счет нелинейной зависимости сил трения в области передней и задней граней инструмента [16–19]. Устойчивость равновесия и рассмотрение притягивающих множеств деформаций рассмотрены не только при точении, но и при фрезеровании [20–23] и сверлении [24, 25]. Подробный анализ исследований ДПР дан в монографии [26].

Необходимо отметить, что практически во всех исследованиях рассматривается автономная динамическая система резания (ДСР) в вариациях относительно равновесия. В последнее десятилетие опубликованы работы, в которых изучаются неавтономные ДСР, возмущенные периодическими воздействиями. Они рассматривают влияние периодических возмущений на формируемую резанием геометрическую топологию поверхности [27–29]. Показано, что ДПР оказывает влияние на формируемую резанием геометрическую топологию и изнашиваемость режущего инструмента [30], причем развитие износа сопровождается изменениями вибраций. Поэтому ДПР рассматривалась и при создании систем виброакустической диагностики износа [31–36]. Анализировались изменения сил [36], вибраций [32–34] и акустических характеристик [35].

Износ является следствием множества физических взаимодействий, сопровождающих обработку [37–40]. В ходе становления знаний об изнашивании сформировалась гипотеза: интенсивность изнашивания связана с необратимыми преобразованиями энергии (НПЭ) в зоне резания [41, 42]. Выполнены многочисленные эксперименты, подтверждающие справедливость этой концепции [43, 44]. Было обнаружено, что по мере увеличения износа имеет место изменение вибрационных характеристик [42], в том числе бифуркации притягивающих множеств деформаций [43]. Наконец, была сформулирована гипотеза о существовании оптимальных по износостойкости инструментов технологических параметров, задаваемых траекториями исполнительных элементов станка (ТИЭС). Им соответствует оптимальная мощность необратимых преобразований энергии в зоне резания, оцениваемая, например, температурой [47–49]. Поэтому предложено выбирать и обеспечивать режимы, при которых температура в зоне резания соответствует оптимальной. Существование режимов, прежде всего скорости резания, при ко-

торых интенсивность изнашивания минимальна, связано с тем, что по мере изменения мощности НПЭ варьируются преобладающие физические механизмы изнашивания [49–54], учитывающие усталостные, фрикционные, адгезионные, диффузионные и трибохимические взаимодействия. Эта концепция положена, например, в основу определения рациональных технологических режимов в фирме Sandvik Coromant [55].

Приведенный анализ показывает, во-первых, что текущее изнашивание инструмента является результатом внутрисистемных взаимодействий инструмента и заготовки, осуществляемых через процесс резания. Эти взаимодействия имеют различную физическую природу, но первичным их источником является работа и мощность НРЭ механической системы. Поэтому в таких взаимодействиях принципиальное значение имеют свойства ДСР. Во-вторых, интенсивность изнашивания зависит от двух конкурирующих процессов – адаптации взаимодействий инструмента к процессу резания и деградации свойств, проявляющихся в развитии износа. Все взаимодействия в ДСР взаимосвязаны и могут играть роль взаимосодействий в направлении цели функционирования обеспечить минимум интенсивности изнашивания. В-третьих, генератором интенсивности изнашивания служит не текущее значение мощности НПЭ, а вся траектория мощности НПЭ механической системы по совершенной работе. Наконец, развитие износа является лишь одним из проявлений эволюционного изменения свойств процесса резания, обусловленного НПЭ в зоне резания. Износ и параметры формируемой резанием динамической связи функционально связаны и вызывают явления самоорганизации и внутренней перестройки свойств ДСР. Однако именно влияние динамики внутрисистемных взаимосвязей с учетом процесса изнашивания на основе учета необратимых преобразований энергии в ДСР практически не исследовано.

В связи с этим в статье ставится *цель* раскрытия взаимозависимости износа и параметров ДСР, эволюция которых зависит от траектории «мощность – работа» необратимых преобразований энергии в зоне резания. Открывается также не изученное направление повышения износостойкости инструментов на основе синергетического согласования эволюционных свойств изнашиваемости и параметров ДСР.

Для достижения цели были поставлены следующие *задачи*:

– разработать математический инструментарий, позволяющий изучать изнашивание инструментов в ДСР как в единой взаимосвязанной системе, эволюция которой обусловлена НПЭ в зоне резания;

– при разработке математической модели необходимо учесть, что интенсивность изнашивания зависит не только от текущей мощности НПЭ, но и от ее предыстории, и на нее влияют все параметры ДСР и технологические режимы;

– создать методику экспериментально-аналитического изучения эволюционных изменений ДСР, в том числе методы параметризации уравнений эволюционной динамики;

– привести пример ее использования при продольном точении стали 10ГН2МФА.

Изложенные в статье материалы характеризуют приложения синергетического метода анализа и синтеза к задачам обработки резанием на металлорежущих станках [56–58].

Методы

Прежде всего остановимся на математическом моделировании эволюционной ДСР, в которой учтем функциональную связанность работы $A(t)$ и мощности $N(t)$ НПЭ с параметрами $\mathbf{p}(\mathbf{w}) = \{p_1(w), p_2(w), \dots, p_n(w)\}$ формируемой процессом резания динамической связи. Тем самым учтем функциональную связанность $A(t)$ и $N(t)$ со свойствами ДСР. В свою очередь, на основе изучения связи износа с параметрами динамической связи учтем изменения свойств системы, в том числе мощности НПЭ с эволюционными изменениями износа. Эволюционные изменения износа представим в виде его зависимости от фазовой траектории «мощность – работа», для этого воспользуемся интегральным оператором Вольтерры второго рода [59]. Положим также, что жесткость заготовки на порядок больше, чем у подсистемы инструмента. Тогда эволюционные свойства ДСР можно раскрыть, если анализировать систему

$$\begin{cases}
 \mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{p}) + \mathbf{f}(t); & (a) \\
 \mathbf{p}(\mathbf{w}) = \{p_1(w), p_2(w), \dots, p_n(w)\}; & (b) \\
 N(t) = F^{(0)}(t)V_{\Sigma}(t); \quad A(t) = \int_0^t N(\xi) d\xi; & (c) \\
 T^{(0)} \frac{dF^{(0)}}{dt} + F^{(0)}(t) = \rho [1 + \mu \exp[\varsigma(V_3 - v_3)]] \left(t_P^{(0)} - X_1 \right) \int_{t-T}^t \{V_2 - v_2(\xi)\} d\xi; & (d) \\
 w(A) = \alpha_1 A + \alpha_2 \int_0^{A(t)} \{ \exp[-\lambda_1(A - \xi)] + \mu_w \exp[\lambda_2(A - \xi)] \} N(\xi) d\xi, & (e)
 \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{m}, \mathbf{h}, \mathbf{c}$ – матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов подсистемы инструмента соответственно размерностью $\left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{мм}} \right], \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}} \right], \left[\frac{\text{кг}}{\text{мм}} \right]$; $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathfrak{R} \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$, $d\mathbf{X} / dt = \mathbf{v} = \{v_1, v_2, v_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – векторы деформаций инструмента и их скоростей размерностью $[\text{мм}], [\text{мм/с}]$; $\mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{p}) = \{F_1, F_2, F_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – модель сил резания, выраженных через деформации и ТИЭС

$\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3\}^T \in \mathfrak{R}_L^{(3)}$ и $d\mathbf{L} / dt = \mathbf{V} = \{V_1, V_2, V_3\}^T \in \mathfrak{R}_L^{(3)}$. Размерность сил $\mathbf{F}$ – $[\text{кг}]$, перемещений $\mathbf{L}$ – $[\text{мм}]$ и скоростей $\mathbf{V}$ – $[\text{мм/с}]$. Соответственно $\mathbf{L}$ – траектории исполнительных элементов; $\mathbf{f}(t) = \{f_1, f_2, f_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$ – вектор возмущений. Кроме этого силы $\mathbf{F} = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ можно представить в виде их модуля $F^{(0)}$ и угловых коэффициентов χ_i , удовлетворяющих условиям нормировки.

Система (1) раскрывает следующие механизмы взаимного влияния подсистем. Подсистема (1(a)) раскрывает преобразование сил $\mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{p}) + \mathbf{f}(\mathbf{t})$, действующих на инструмент, в деформации $\mathbf{X}$. Если система резания является автономной, то $\mathbf{f}(\mathbf{t}) = 0$. Выражение (1(b)) утверждает, что задана функциональная связь износа w с параметрами p_i математической модели динамической связи. Зависимости (1(c)) раскрывают смысл формирования работы и мощности необратимых преобразований энергии. Если $V_\Sigma = \text{const}$ и $F^{(0)} = \text{const}$, то работа отличается от времени на постоянный коэффициент. Здесь $F^{(0)}$ является суммарной силой, действующей по направлению скорости резания V_Σ , причем скорость резания состоит из скорости ТИЭС и упругих деформаций. Уравнение (1(d)) определяет формируемую процессом резания динамическую связь, т. е. по выражению Г. Хакена [56] раскрывает взаимодействия системы со средой (процессом обработки резанием).

Это уравнение базируется на гипотезе: модуль силы резания пропорционален площади срезаемого слоя. Коэффициент пропорциональности $\rho[1 + \mu \exp[\zeta(V_3 - v_3)]]$ имеет смысл давления стружки на переднюю грань инструмента в $[\text{кг/мм}^2]$. Он зависит от скорости $V_P^{(0)} = (V_3 - v_3)$. При формировании площади

срезаемого слоя $S = (t_P^{(0)} - X_1) \int_{t-T}^t \{V_2 - v_2(\xi)\} d\xi$

учитывается не только зависимость текущего значения глубины резания от деформации $t_P(t) = (t_P^{(0)} - X_1)$, но и изменение подачи

$S_P^{(0)} = \int_{t-T}^t \{V_2 - v_2(\xi)\} d\xi$ в зависимости от ско-

ростей деформаций $v_2(t)$ и $v_3(t)$. Все параметры в выражении (1(d)) зависят от износа. Однако главные из них, влияющие на устойчивость, – это $p_1 = \rho$ и $p_2 = T^{(0)}$.

Наконец, уравнение (1(e)) представляет собой модифицированное интегральное уравнение

Вольтерры второго рода [59], которое раскрывает зависимость износа не от работы сил, а от траектории «мощность – работа». Причем ядра интегральных операторов эволюции учитывают два противоположных эффекта: адаптацию инструмента к процессу резания и процесс его деградации. Параметры этого интегрального уравнения, получаемые в результате их идентификации, имеют следующие размерности: $\lambda_1 \rightarrow [(\text{кгм})^{-1}]$, $\lambda_2 \rightarrow [(\text{кгм})^{-1}]$, $\alpha_1 \rightarrow [(\text{кг})^{-1}]$, $\alpha_2 \rightarrow [\text{с/мм}(\text{кг})^2]$ и $\alpha_3 \rightarrow [\text{с/мм}(\text{кг})^2]$.

Если анализировать систему (1) в целом, то ее необходимо отнести к классу интегро-дифференциальных функционально связанных систем [59]. Функциональная связанность обусловлена взаимозависимостью сил от параметров системы, которые сами изменяются по мере совершения работы. Функциональная связанность вызывает самоорганизацию [58], причем, как это видно из системы (1), самоорганизация зависит как от параметров взаимодействующих подсистем, так и от исходных параметров $\mathbf{p}(\mathbf{w})$ динамической связи. Структурно все координаты изменяются вдоль траектории работы, и они находятся вдали от равновесия, что соответствует условиям динамической перестройки системы [57]. Сложность цифрового моделирования системы (1) заключается прежде всего в вычислении интегрального оператора Вольтерры. Для его вычисления рассмотрим формулу (1(e)) в следующем виде:

$$W(A) = H_1(A) + H_2(A) + H_3(A), \quad (2)$$

где $H_1(A) = \alpha_1 A$;

$$H_2(A) = \alpha_2 \int_0^A \exp[-\lambda_1(A - \xi)] N(\xi) d\xi;$$

$$H_3(A) = \alpha_3 \int_0^A \exp[\lambda_2(A - \xi)] N(\xi) d\xi;$$

$$N(A) = \{N(\Delta A), N(2\Delta A), N(3\Delta A), \dots, N(n\Delta A)\};$$

$A = n\Delta A$; ΔA – дискретное значение работы сил необратимых преобразований энергии механической системы, подводимой к зоне резания; $\alpha_3 = \alpha_2 \mu_w$. Величина приращения ΔA определяется частотой Найквиста. Тогда вычисление каждой составляющей выражения (2) дает нам

$$\begin{cases} H_1(A) = \alpha_1 n \Delta A; \\ H_2(A) = \frac{\alpha_2}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 \sum_{i=1}^n i \Delta A} \left\{ N_1 e^{-\lambda_1 (n-1) \Delta A} [1 - e^{-\lambda_1 (\Delta A)}] + N_2 e^{-\lambda_1 (n-2) \Delta A} [1 - e^{-\lambda_1 (\Delta A)}] + \dots \right. \\ \left. + N_{n-1} e^{-\lambda_1 \Delta A} [1 - e^{-\lambda_1 (\Delta A)}] + N_n e^{-\lambda_1 (n-n) \Delta A} [1 - e^{-\lambda_1 (\Delta A)}] \right\}; \\ H_3(A) = \frac{\alpha_3 [\exp(-\lambda_2 \Delta A) - 1]}{\lambda_2}. \end{cases} \quad (3)$$

Полный дискретный аналог выражения (1(е)) берется в основу для моделирования эволюционных изменений динамической системы резания:

$$\begin{aligned} w(A) = & \alpha_1 n \Delta A + \frac{\alpha_2 [1 - \exp(-\lambda_1 \Delta A)]}{\lambda_1} \times \\ & \times \sum_{i=1}^{i=n} N_i \exp[-\lambda_1 (i-1) \Delta A] + \\ & + \frac{\alpha_3 [\exp(-\lambda_2 \Delta A) - 1]}{\lambda_2} \times \\ & \times \sum_{i=1}^{i=n} N_i \exp[-\lambda_2 (i-1) \Delta A], \end{aligned} \quad (4)$$

где N_i – среднее значение мощности в пределах i -го приращения работы.

Как видно, значение интегрального оператора определяется не только проинтегрированной мощностью НПЭ в рассматриваемый момент работы, но и ее предысторией. Влияние предыстории зависит от ядра, которое затухает по экспоненциальному закону для составляющей адаптации и расходится для составляющей деградации. Таким образом, система (1) является структурно неустойчивой. В такой системе, согласно И. Пригожину [57], должны формироваться различные притягивающие множества, названные им диссипативными структурами. В частности, если $N_i = N = \text{const}$, то

$$\begin{aligned} w(A) = & \alpha_1 A + N \times \\ & \times \left\{ \frac{\alpha_2}{\lambda_1} [1 - e^{-\lambda_1 A}] + \frac{\alpha_3}{\lambda_2} [e^{\lambda_2 A} - 1] \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно, траектория мощности НПЭ «окрашивает» своими свойствами, зависящими от ДСР, эволюцию износа инструмента. Таким образом, эволюция износа согласно модели (1) зависит, во-первых, от параметров взаимодействующих подсистем; во-вторых, она изменя-

ется при варьировании начальных параметров формируемой резанием динамической связи; в-третьих, она изменяется при вариациях управляющих параметров. Управляющими параметрами в системе (1) являются технологические режимы. Приведенные особенности математической модели (1) позволяют наблюдать и прогнозировать изменение свойств ДСР в ходе функционирования. На основе этой модели можно оценивать не только износ, но и траектории формообразующих движений, ответственные за формируемую резанием геометрическую топологию поверхности заготовки. Важно отметить, что каждая эволюционная траектория износа зависит от начальных параметров ДСР и возмущений, т. е. она уникальна (как и динамическая структура конкретного станка).

Для иллюстрации методики анализа эволюционных изменений износа рассмотрим пример продольного точения вала из стали 10ГН2МФА с помощью цифрового моделирования системы (1) с учетом выражения (4). Выбор марки стали определился потребностями предприятия АО «АЭМ-технологии “Атоммаш”», по заданию которого были выполнены исследования. Экспериментальная часть исследований проводилась на стенде, созданном на базе модернизированного станка 1К62 (рис. 1).

Модернизация заключалась в следующем.

1. Вместо асинхронных двигателей ТИЭС установлены регулируемые частотные приводы вращения шпинделя и скоростей продольной и поперечной подачи. Частоты вращения серводвигателей управлялись ЭВМ.

2. Вместо суппорта установлен измерительный комплекс STD201-1 производства фирмы National Instruments (США), который обеспечивал измерение силы резания и интегрального значения температуры (по паспортным данным в частотном диапазоне до 25 кГц) и температуры (рис. 1).

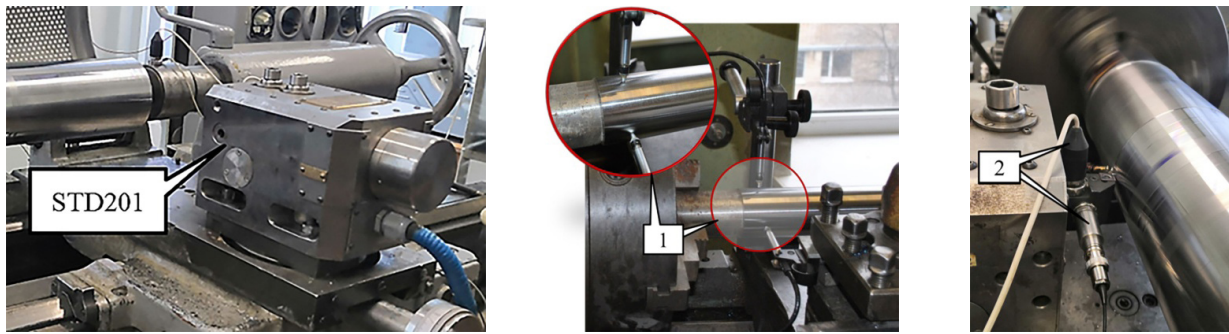


Рис. 1. Экспериментальный стенд для изучения эволюции износа режущего инструмента

Fig. 1. Experimental unit for studying the evolution of cutting tool wear

3. Вибрации измерялись акселерометрами А603С01 с чувствительностью 10,2 мВ/(м/с²) и частотным диапазоном 0,4...15 000 Гц, установленными непосредственно на инструменте (поз. 2 на рис. 1). Использовались также бесконтактные токовихревые датчики зазора между измерительным преобразователем и вращающейся заготовкой, которые ассоциировались с вибрационными последовательностями колебательных смещений (поз. 1 на рис. 1).

Все измерительные устройства через интерфейсный блок фирмы National Instruments (блоки NI-9234, NI-9237, NI-9219) с частотой дискретизации до 100 кГц связаны с ЭВМ. Преобразование ускорений в смещения выполнялось цифровым интегрированием на ЭВМ с удалением тренда, обусловленного неопределенностью начальных значений. На основе измеренных данных также алгоритмически вычислялись значения мощности и работы сил резания. Таким образом, на исследовательском стенде имеется возможность измерения в процессе резания всей информации для оценивания связи износа с основными координатами ДСР, а также для параметризации системы (1). При оценивании износа по задней грани в качестве силы рассматривалось ее относительное значение, приведенное к единице длины контакта режущей кромки с зоной резания.

Использование регулируемых приводов ТИЭС позволяло от ЭВМ задавать ТИЭС по различным алгоритмам, в частности, по алгоритму $N = \text{const}$. Тогда на основе выражения (5) можно идентифицировать параметры α_1 , α_2 , α_3 , λ_1 и λ_2 интегрального оператора (1(e)). В основу идентификации положены две экспериментально полученные аппроксимации: $w(A)$

и $dw(A) / dA = v^{(w)}(A)$. Идентификация выполнялась в два этапа. На первом этапе по кривым $w(A)$ оценивались параметры λ_1 и λ_2 . Причем λ_1 оценивался при $A \in (0, A^{(\min)})$. Здесь $A^{(\min)}$ – значение работы, при которой $v^{(w)}(A) = \min$. Это значение легко определяется по кривой $v^{(w)}(A) = \partial w(A) / \partial A$. Параметр λ_2 оценивался при $A \in (A^{(\min)}, A^{(\max)})$. Здесь $A^{(\max)}$ – работа, при которой износ достигает критического значения. В наших исследованиях $w(A^{(\max)}) = 0,8$ мм. На втором этапе оценивались параметры α_1 , α_2 , α_3 из уравнения

$$\alpha \mathbf{A} = \mathbf{v}, \quad (6)$$

где $\mathbf{v} = \{v^{(w)}(0), v^{(w)}(A^{(\min)}), v^{(w)}(A^{(\max)})\}^T$ – вычисленные на основе экспериментов значения; $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}^T$ – вектор оцениваемых параметров;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & N & N \\ 1 & N \exp(-\lambda_1 A^{(\min)}) & N \exp(\lambda_2 A^{(\min)}) \\ 1 & N \exp(-\lambda_1 A^{(\max)}) & N \exp(\lambda_2 A^{(\max)}) \end{bmatrix}.$$

Методика идентификации параметров подсистемы инструмента и формируемой резанием динамической связи подробно описана в нашей монографии [60, стр. 52–63]. Выполненные исследования по идентификации параметров ДСР, а также параметров и ядер интегрального оператора (1(e)), позволили выявить следующие их особенности.

1. Матрицы $\mathbf{m}$, $\mathbf{h}$, $\mathbf{c}$ при обработке на конкретном станке остаются неизменными.

2. На свойства формируемой резанием динамической связи основное влияние оказывают два параметра. Параметр $p_1 = \rho$ зависит от предельного состояния материала в зоне резания, которое при заданной геометрии и скорости резания практически постоянно [38]. Его зависимость от скорости резания моделируется выражением $\rho[1 + \mu \exp[\zeta(V_3 - v_3)]]$. Износ инструмента, изменяющий геометрию инструмента и увеличивающий объем пластической деформации в зоне резания, вызывает увеличение этого параметра. Второй по значимости параметр $p_2 = T^{(0)}$ принципиально зависит от скорости резания. Это связано с тем, что путь, пройденный инструментом в направлении скорости резания, при переходе от одного состояния равновесия к другому остается неизменным при обработке конкретного материала инструментом неизменной геометрии. Он возрастает при развитии износа. Для рассматриваемых условий обработки зависимость параметров $\rho(w)$ и $T^{(0)}(w)$ от износа w по данным экспериментальных исследований можно представить следующими регрессионными уравнениями:

$$\begin{cases} \rho(w) = \rho(0)[1 + \varepsilon_\rho(w)], \\ T^{(0)}(w) = T^{(0)}(0)[1 + \varepsilon_T(w)], \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\varepsilon_\rho(w) = k^{(\rho)}[\exp(\alpha^{(\rho)}w) - 1];$$

$$\varepsilon_T(w) = k^{(T)}[\exp(\alpha^{(T)}w) - 1].$$

В базовой модели параметры для стали 10ГН2МФА равны $k^{(\rho)} = 3,0$, $\alpha^{(\rho)} = 0,8 \text{ мм}^{-1}$, $k^{(T)} = 1,6$, $\alpha^{(T)} = 0,8 \text{ мм}^{-1}$. Таким образом, давление стружки ρ и постоянная времени $T^{(0)}$ стружкообразования имеют тенденцию к увеличению по мере развития износа инструмента.

3. Параметры α_1 , α_2 , α_3 , λ_1 и λ_2 интегрального уравнения (1(е)) остаются постоянными, но эволюционные траектории зависят от параметров ДСР. Поэтому вариации исходных параметров ДСР влияют на все взаимосвязанные эволюционные траектории, в том числе траекторию износа вдоль траектории совершенной при резании работы.

Величина износа оценивалась по высоте прямоугольника, площадь которого равна площади следа на задней грани инструмента от износа. Площадь следа измерялась по сетке на инструментальных микроскопах. На этом же стенде проводились натурные испытания изнашиваемости. В табл. 1–3 приведен пример исходных начальных параметров ДСР и инте-

Таблица 1

Table 1

Параметры подсистемы инструмента
Parameters of the tool subsystem

$h_{1,1}$, 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
2,5	1,3	0,85	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
10 000	4000	2000	2000	500	400

Таблица 2

Table 2

Параметры динамической связи при $w(A) = 0$
Parameters of the dynamic link when $w(A) = 0$

Материал	ρ , кг/мм ²	ζ , с/мм	$T^{(0)}$, с	μ
10ГН2МФА	170,0	0,4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,4

Идентифицированные параметры интегрального уравнения
Identified parameters of the integral equation

Материал	$\alpha_1, (\text{кг})^{-1}$	$\alpha_2, (\text{с/кг}^2\text{мм})^{-1}$	$\alpha_3, (\text{с/кг}^2\text{мм})^{-1}$	$\lambda_1, (\text{кг} \cdot \text{мм})^{-1}$	$\lambda_2, (\text{кг} \cdot \text{мм})^{-1}$
10ГН2МФА	$0,82 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$0,12 \cdot 10^{-5}$	0,4	0,2

грального уравнения (1(е)) для продольного точения стали 10ГН2МФА на следующих режимах: скорость резания $V_p = 1,2$ м/с, подача $S_p = 0,12$ мм/об, глубина резания $t_p = 1$ мм. Режимы выбраны штатными для предприятия АО «АЭМ-технологии “Атоммаш”». Приведенная масса подсистемы инструмента равна $m = 4 \cdot 10^{-3}$ кг · с²/мм.

Результаты и их обсуждение

Вначале рассмотрим результаты цифрового моделирования эволюции износа. На рис. 2, а и б приведены вычисленные кривые износа во времени для двух начальных значений $\rho(0)$. На рис. 2, в приведены примеры траекторий деформаций инструмента в направлении X_1 .

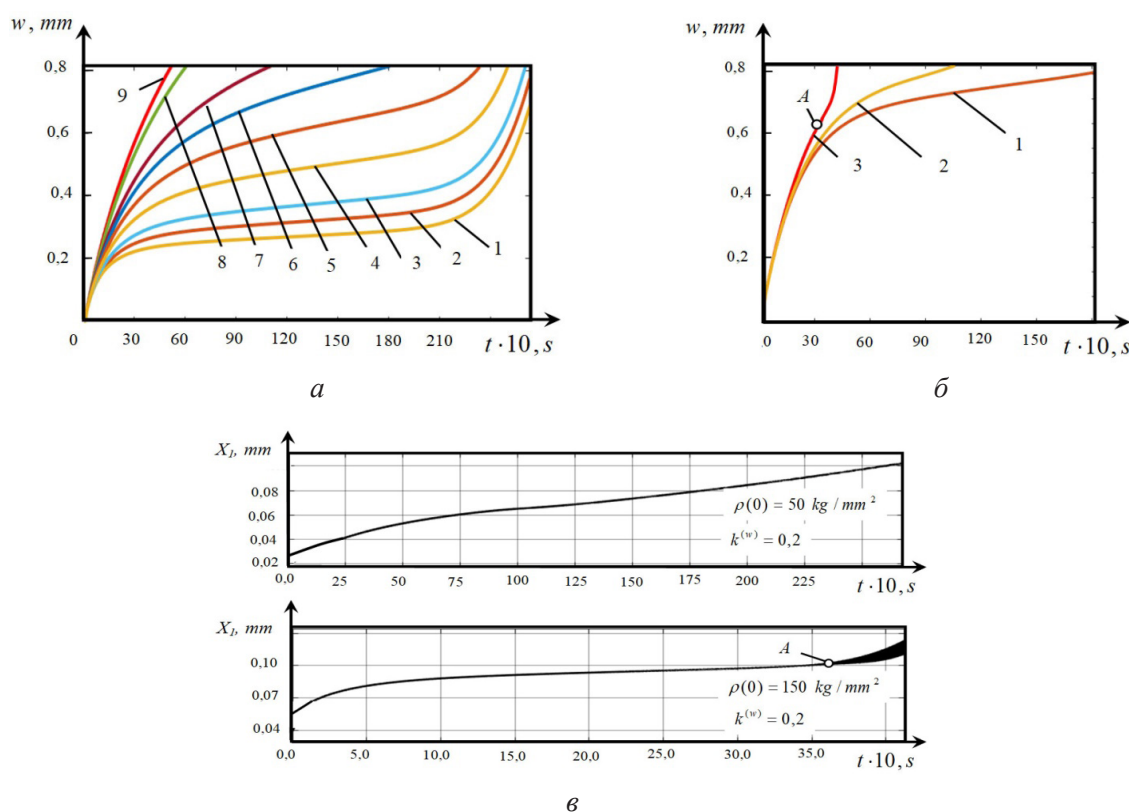


Рис. 2. Диаграммы эволюции износа (а, б) и пример траекторий деформаций (в) при вариациях ρ и $k^{(w)}$:

а – при $\rho(0) = 50 \text{ кг/мм}^2$ (1 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,05$; 2 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,1$; 3 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,2$; 4 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,3$; 5 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,4$; 6 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,5$; 7 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,6$; 8 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,7$; 9 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,8$); б – при $\rho(0) = 150 \text{ кг/мм}^2$ (1 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,05$; 2 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,1$; 3 $\Rightarrow k^{(w)} = 0,2$)

Fig. 2. Diagrams of wear evolution (a, b) and deformation trajectories (c) under variations of ρ and $k^{(w)}$:

а – for $\rho(0) = 50 \text{ kg/mm}^2$ (1 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.05$; 2 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.1$; 3 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.2$; 4 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.3$; 5 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.4$; 6 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.5$; 7 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.6$; 8 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.7$; 9 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.8$); б – for $\rho(0) = 150 \text{ kg/mm}^2$ (1 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.05$; 2 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.1$; 3 $\Rightarrow k^{(w)} = 0.2$)

Диаграммы приведены в функции времени при достижении износа по задней грани 0,8 мм. При вариациях начального значения $\rho(0)$ изменяется вся эволюционная траектория. Причем вдоль траектории $A(t)$ возможны бифуркации притягивающих множеств. На рис. 3 приведены примеры траекторий эволюции при $\rho(0) = \text{var}$ и $k^{(w)} = 0,2$. Точки бифуркаций обозначены: А, В, С, D, Е. Им соответствуют перегибы на кривых эволюции износа. Скорость изнашивания, как видно из приведенных иллюстраций, всегда положительна: $dw/dt > 0$. Если «медленно» смещающееся равновесие устойчиво, то диаграммы развития износа показаны на рис. 3 жирными линиями до точек бифуркаций. После точек бифуркаций, обозначенных А, В, С, D и Е, наблюдается отклонение траекторий эволюции. Точки бифуркаций на диаграмме износа (рис. 3, а) и на временных траекториях (рис. 3, б) совпадают.

Если в процессе вычисления эволюционной траектории в уравнении (1(а)) положить $d^2X/(dt)^2 = 0$ и $dX/dt = 0$, то в ходе эволюции система будет абсолютно устойчивой. Тогда кривые износа продолжают эволюцию, представленную уже пунктиром, т.е. износоустойчивость инструмента будет выше кривых, представленных сплошными линиями. Они учитывают, что в выделенных точках либо теряется устойчивость равновесия упругих деформаций, либо наблюдается преобразование одного притягивающего множества в другое. Например, в точке Е наблюдается преобразование предельного цикла через каскад бифуркаций удвоения периода в хаотический аттрактор. Заметим, что формирование различных притягивающих множеств деформаций в окрестности эволюционной траектории деформаций, как правило, вызывает увеличение интенсивности изнашивания инструмента. Однако известны примеры, когда возбуждение вибраций приводит к снижению интенсивности изнашивания [61]. Тем не менее в этом случае на параметры вибраций накладываются ограничения, выполнение которых возможно далеко не всегда.

Важно отметить, что периодическим деформациям соответствуют почти $\delta(t - t_i)$ -образные силовые импульсы. Если предельный цикл явля-

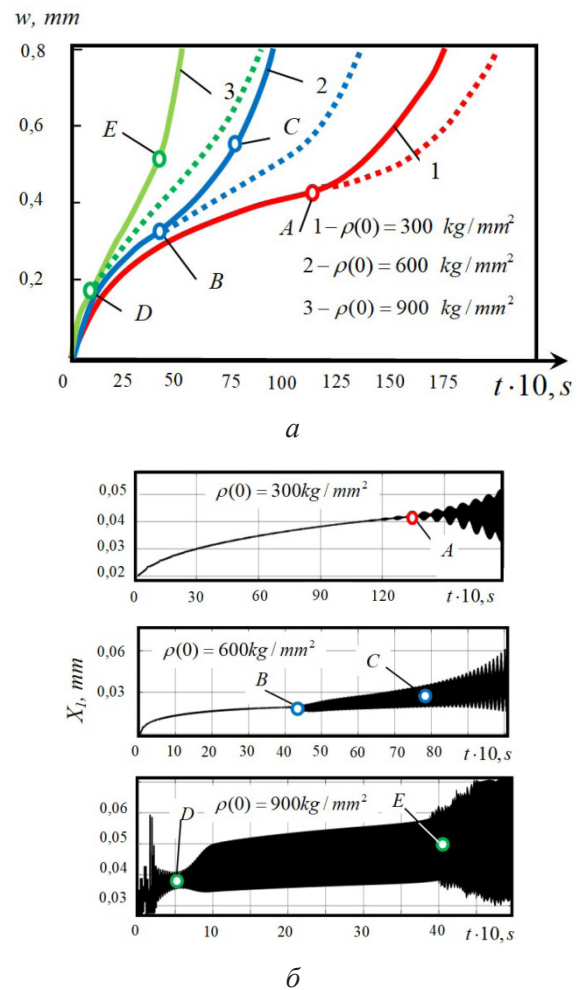


Рис. 3. Эволюция износа (а) и траекторий деформационных смещений (б)

Fig. 3. Evolution of wear (a) and deformation displacement trajectories (b)

ется идеальным, то ему соответствует идеальная импульсная последовательность мощности с циклической частотой $\Omega^{(3)} = (t_{i+1} - t_i)^{-1}$. Ей соответствует

$$\delta(\Omega - \Omega^{(3)}), \quad \Omega \in (0, \infty)\text{-образный}$$

спектр сил. Эффекты экстремальной зависимости скорости изнашивания от времени проявляются не всегда. В зависимости от параметров, прежде всего от матриц $\mathbf{m}$, $\mathbf{h}$, $\mathbf{c}$ и параметров интегрального оператора, имеет место смещение минимума скорости изнашивания.

Чувствительность эволюции к выделяемой в зоне резания энергии может меняться в зависимости от начальных параметров ДСР. Однако главное значение имеют параметры, характеризующие формируемую процессом резания динамическую связь. В связи с этим рассмотрим эволюционные диаграммы при учете одновременной

зависимости параметров ρ и $T^{(0)}$ от износа (рис. 4). На рис. 4, *a* выделены точками А, В, С, D, Е моменты бифуркаций притягивающих множеств деформаций. На траекториях деформаций рис. 4, *б, в, г* точки бифуркаций имеют те же обозначения. Если в случае, приведенном на рис. 4, изменить начальные параметры системы, то эволюционные траектории могут существенно измениться.

Наглядную иллюстрацию эволюционных изменений дают совместные диаграммы эволюции параметров $\rho(0)$ и $T^{(0)}(0)$, а также фигуративной линии в плоскости $\rho(w) - T^{(0)}(w)$ (рис. 5). На иллюстрации пятиконечными звездами отмечены точки, в которых система теряет устойчивость. Расположение фигуративных линий в плоскости варьируемых параметров зависит

как от неизменных параметров взаимодействующих подсистем, так и от эволюционно изменяющихся параметров формируемой процессом резания динамической связи. В частности, во всех случаях при уменьшении добротности колебательных контуров, формируемых взаимодействующими подсистемами, вариации эволюционных траекторий становятся менее чувствительными к изменениям начальных параметров системы. Цифровые эксперименты также показывают, что эволюционные траектории изменяются как при варьировании параметров взаимодействующих подсистем, так и при изменениях технологических режимов, которые в заданной системе играют роль управляющих параметров.

Результаты изучения эволюции при варьировании параметров ДСР показывают, что эво-

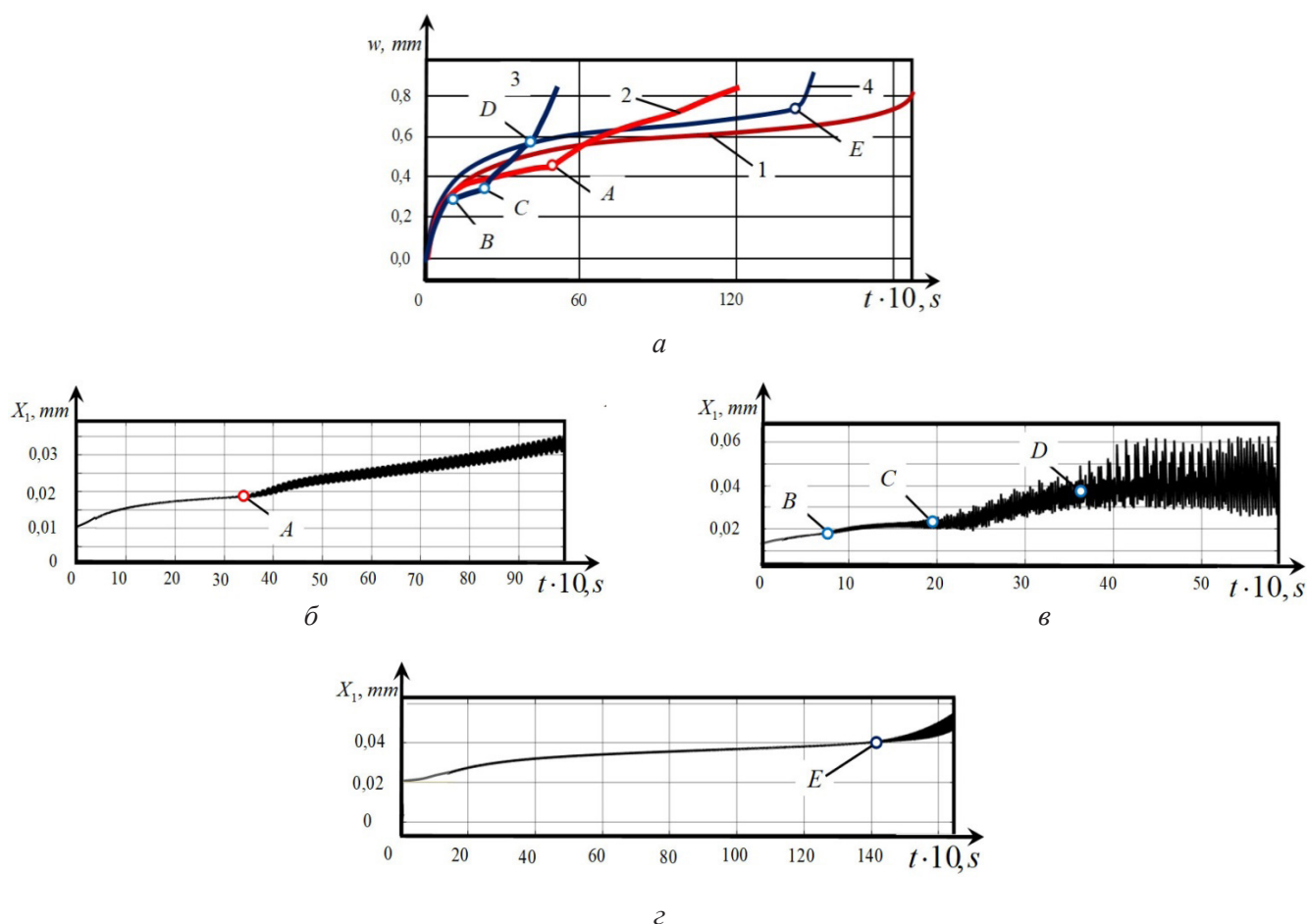


Рис. 4. Эволюция динамической системы резания за счет совместного изменения параметров ρ и $T^{(0)}$: *a* – диаграммы развития износа; *б, в, г* – траектории деформационных смещений в направлении X_1 , соответствующие кривым эволюции износа 2, 3 и 4

Fig. 4. Evolution of the dynamic cutting system due to the coupled variation of parameters ρ and $T^{(0)}$: *a* – wear development diagrams; *б, в, г* – deformation displacement trajectories in the X_1 direction, corresponding to wear evolution curves 2, 3, and 4, respectively

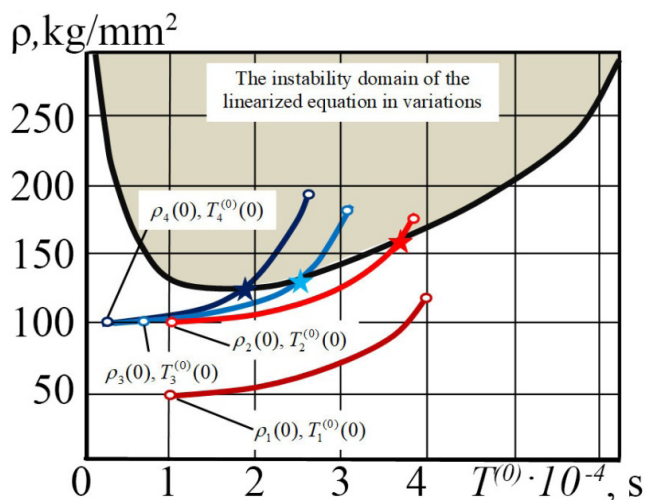


Рис. 5. Наложение эволюционных траекторий параметров системы на область устойчивости в плоскости этих параметров

Fig. 5. Superposition of the evolutionary trajectories of the system parameters onto the stability region in the plane of these parameters

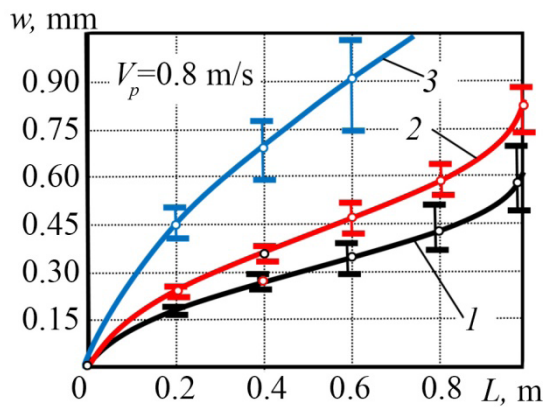
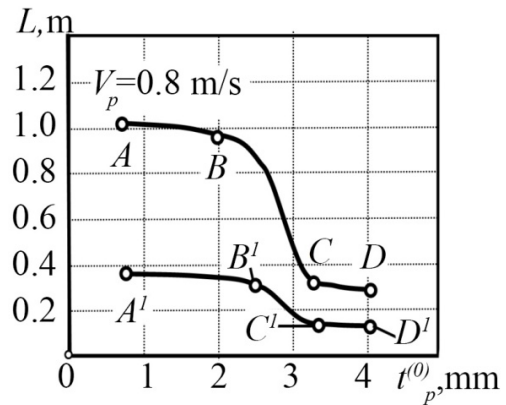
люционные траектории, в том числе изменение износа во времени, могут обладать высокой чувствительностью к вариациям параметров и возмущений, действующих на систему. Мы имеем полную аналогию к рассмотрению проблемы грубости динамических систем, впервые сформулированную еще в 1950-х годах [62]. Необходимо признать, что сейчас в экспериментальных исследованиях изнашиваемости инструментов практически никак не оговариваются свойства чувствительности эволюции к малым вариациям параметров ДСР. Этим, на наш взгляд, объясняются порой принципиальные изменения износостойкости при переносе результатов исследований с одного станка на другой. Кроме того, разработанная методика и математический инструментарий позволяют решить задачу согласования эволюции с параметрами ДСР. Результаты цифрового моделирования также показывают, что интенсивность изнашивания в одной и той же системе изменяется в ходе эволюции. Изменяются и оптимальные по износостойкости режимы, прежде всего скорость резания. Поэтому принятое в инженерной практике понятие оптимальной скорости резания должно быть заменено на понятие оптимальной траектории скорости вдоль работы.

Для оценки адекватности приведенных выше математического инструментария и результатов цифрового моделирования рассмотрим показате-

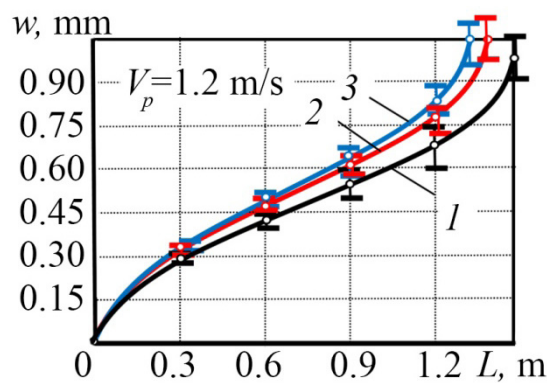
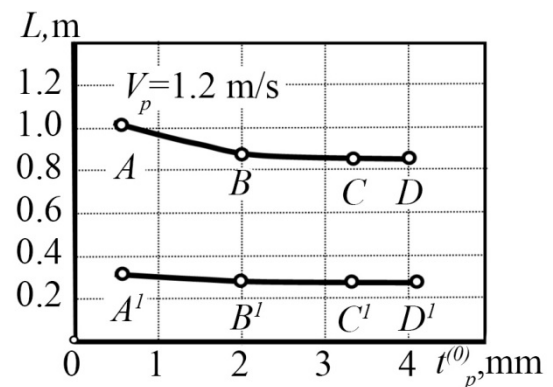
льный пример экспериментального определения эволюции износа при продольном точении вала из стали 10ГН2МФА инструментом, снабженным твёрдосплавными пластинами Т15К6. Геометрия инструмента: передний угол $\gamma = 6^\circ$, задний угол $\alpha = 6^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 95^\circ$, радиус при вершине пластины $r = 0,5$ мм (рис. 6).

Выше показано, что эволюция зависит от вариаций параметра $\rho(0)$. В экспериментах удобнее рассматривать изменения $t_p^{(0)}$, который наряду с $\rho(0)$ влияет на коэффициент усиления ДСР. Правда, $t_p^{(0)}$ в ходе эволюции остается неизменным, а изменяются лишь параметры динамической связи, начальные значения которых остаются неизменными. Каждой экспериментальной точке на графиках рис. 6 соответствует не менее пяти измерений, круглыми точками показаны математические ожидания, для математических ожиданий также приведены оценки дисперсии. На левых иллюстрациях приведены кривые износа по мере увеличения глубины $t_p^{(0)}$, на правых – графики, раскрывающие зависимость пути резания L при достижении износом своего критического значения.

Обращает на себя внимание прежде всего немонотонная зависимость изнашивания при возрастании глубины, а также ее зависимость от скорости резания. При скорости резания 0,8 м/с вариации глубины в пределах (0,5...2,5) мм практически не вызывают изменения диаграммы износа, но достаточно небольшого дальнейшего увеличения глубины, чтобы приращение износа при одном и том же приращении работы возросло в несколько раз. Уже этот пример показывает, что на основе согласования глубины резания с параметрами ДСР можно увеличить стойкость инструмента при его предельном значении 0,6 мм почти в три раза. Возрастание глубины при скорости резания 1,2 м/с вызывает незначительное изменение интенсивности изнашивания, но при этом несколько снижается интенсивность изнашивания. Такая же немонотонная зависимость изнашивания наблюдается и при вариациях матриц жесткости инструмента, а также при точении инструментами, имеющими различный вылет из зажимного приспособле-



a



b

Рис. 6. Наложение эволюционных траекторий параметров системы на область устойчивости в плоскости этих параметров

Fig. 6. Superposition of the evolutionary trajectories of the system parameters onto the stability region in the plane of these parameters

ния. Эти данные подтверждают, что параметры формируемой резанием динамической связи, как и матрицы жесткости, диссипации и инерционных коэффициентов подсистем инструмента и заготовки, непосредственно влияют на изнашиваемость.

Напомним, например, в работе [39, стр. 211–219] указано, что вариации глубины резания не влияют на интенсивность изнашивания. В примере на рис. 6 точение с глубиной резания 2,5 мм приводит к потере устойчивости равновесия упругих деформаций, бифуркации их притягивающих множеств по мере совершения работы по сценарию, аналогичному рис. 4, в. Как следствие, даже малое увеличение глубины резания с 2,2 до 2,7 мм приводит к увеличению интенсивности изнашивания почти в три раза. Подчеркнем, что для динамической подсистемы заготовки с другими параметрами матриц жесткости и диссипации ситуация может быть другой. Малые влияния вариаций глубины резания на эво-

люционную траекторию при скорости резания 1,2 м/с связаны также с уменьшением постоянной времени стружкообразования при возрастании скорости. Обратим внимание еще на эффекты, связанные с изменением добротности некоторых колебательных контуров, образуемых совместно взаимодействующими подсистемами с динамической связью, формируемой процессом резания. Как правило, корни характеристического полинома линейризованного уравнения в вариациях относительно равновесия по мере развития износа двигаются в сторону мнимой оси. Тогда добротность колебательного контура, соответствующего этим корням, возрастает, т. е. в колебаниях усиливается силовой шум, всегда сопутствующий обработке [31–35]. При этом, как правило, при потере устойчивости по мере приближении износа инструмента к своему критическому значению в ДСР развивается хаотическая динамика. Все указанные эффекты хорошо заметны при анализе эволюционных траекторий



деформаций при цифровом моделировании системы (см. рис. 3–5).

Разработанная математическая модель и приведенная методика идентификации ее параметров позволяет изучать эволюцию износа режущего инструмента как единой системы, в которую включены все подсистемы, определяющие динамику процесса резания в целом. Приведенные результаты цифрового моделирования показывают, что вдоль траектории работы необратимых преобразований энергии за счет изменения параметров ДСР наблюдаются как медленные изменения свойств системы, так и бифуркации формируемых в окрестности траектории притягивающих множеств деформаций и соответствующих им сил, а следовательно, мощности. В отдельных случаях имеют место бифуркации типа вилки, и тогда после точки бифуркаций наблюдаются ветвления эволюционных траекторий. В таких случаях точное предсказание эволюции износа невозможно.

Зависимость эволюции ДСР от вариаций параметров и возмущений позволяет не только согласовать эволюцию износа с параметрами ДСР, но и обосновать требования к проведению экспериментальных исследований износостойкости. Эти исследования необходимо выполнять на множестве параметров ДСР, удовлетворяющем малой чувствительности эволюции к вариациям этих параметров. Строго говоря, в экспериментах необходимо обеспечивать идентичность динамических свойств экспериментального оборудования, на котором выполняются исследования, и того оборудования, на котором будет выполняться обработка. Разработанный математический инструментарий позволяет на стадии технологической подготовки производства анализировать на ЭВМ различные сценарии изготовления деталей с учетом эволюционных изменений свойств обработки. Полученные математические модели также могут стать основой для создания подсистемы эволюционных изменений процесса резания в виртуальных цифровых двойниках обработки.

Заключение

Предложенный математический инструментарий, методика анализа и параметризации эволюционной ДСР позволил выяснить основные

особенности изменений свойств процесса резания в ходе эволюции, обусловленной необратимыми преобразованиями энергии в зоне обработки. На примере эволюции износа режущего инструмента показано, что на его изнашиваемость оказывают влияние как неизменные параметры ДСР, так и эволюционно изменяющиеся параметры формируемой процессом резания динамической связи. Сама же траектория износа, как правило, обладает высокой чувствительностью к малым вариациям исходных параметров ДСР. В связи с этим одной из важных характеристик процесса обработки является чувствительность эволюции к вариациям начальных параметров ДСР и возмущений. На основе этого сформулировано направление повышения износостойкости инструмента, заключающееся в синергетическом согласовании начальных параметров ДСР с ее эволюционными свойствами.

Принципиальное влияние на изнашиваемость оказывает функциональная связанность сил, мощности, траекторий и параметров формируемой резанием динамической связи, которые образуют единую взаимосвязанную самоорганизующуюся систему резания, где управляющими параметрами являются технологические режимы. Поэтому разработанный математический инструментарий в совокупности с методиками параметризации уравнений эволюционной динамики характеризует виртуальную цифровую модель эволюции. Ее применение перспективно как на стадии программирования траекторий ЧПУ, так и при создании систем оценивания и прогнозирования развития износа инструмента непосредственно в процессе резания с помощью систем динамического мониторинга.

Именно это взаимовлияние и зависящая от него мощность необратимых преобразований энергии приводит к тому, что оптимальные (например, по износостойкости инструмента) условия определяются не замороженными значениями технологических режимов, а их траекториями, изменяющимися вдоль пройденного инструментом пути. Функциональная взаимосвязанность всех траекторий системы резания приводит к взаимной зависимости эволюции износа и траекторий формообразующих движений, ответственных за формируемую процессом резания геометрическую топологию поверхности.

Разработанные методики параметризации и математические модели эволюционной системы проиллюстрированы на примере точения стали 10ГН2МФА. Разработанные методики и созданный математический инструментариум внедрены на предприятии АО «АЭМ-технологии «Атоммаш»» при разработке программ для систем ЧПУ.

Список литературы

1. *Hahn R.S.* On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation // Transactions of American Society of Mechanical Engineers. – 1954. – Vol. 76 (4). – P. 593–597. – DOI: 10.1115/1.4014908.
2. *Tobias S.A., Fishwick W.* Theory of regenerative machine tool chatter // The Engineer. – 1958. – Vol. 205 (7). – P. 199–203.
3. *Merrit H.E.* Theory of self-excited machine-tool chatter: Contribution to machine tool chatter research – 1 // Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87 (4). – P. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
4. *Кудинов В.А.* Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
5. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen / J. Tlustý, A. Poláček, C. Danek, J. Spacek.* – Berlin: Verlag Technik, 1962. – 320 p.
6. *Городецкий Ю.И.* Теория нелинейных колебаний и динамика станков // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2001. – № 2. – С. 69–88.
7. *Hanna N.H., Tobias S.A.* A theory of nonlinear regenerative chatter // Journal of Engineering for Industry. – 1974. – Vol. 96 (1). – P. 247–255. – DOI: 10.1115/1.3438305.
8. 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 (4). – P. 207–221. – DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.
9. *Litak G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // Chaos, Solitons & Fractals. – 2002. – Vol. 13 (7). – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-x.
10. *Grabec I.* Chaos generated by the cutting process // Physics Letters A. – 1986. – Vol. 117 (8). – P. 384–386.
11. *Tlustý J., Ismail F.* Basic non-linearity in machining chatter // CIRP Annals. – 1981. – Vol. 30 (1). – P. 299–304. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.
12. *Воронов С.А., Киселев И.А.* Нелинейные задачи динамики процессов резания // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 2 (51). – С. 9–23.
13. *Максаров В.В., Васин С.А., Ефимов А.Е.* Динамическая стабилизация процесса растачивания внутренних поверхностей сварных изделий // СТИН. – 2021. – № 7. – С. 6–10.
14. *Zakovorotny V.L.* Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – 2015. – Vol. 10. – P. 102–116.
15. 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. Gubanov, V.V. Hristoforova // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
16. *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 (9). – P. 1450115. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.
17. *Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P.* Modelling 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.
18. *Insperger T., Stepan G.* Semi-discretization method for delayed systems // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2002. – Vol. 55 (5). – P. 503–518. – DOI: 10.1002/nme.505.
19. *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 (1779). – P. 663–693. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.
20. *Stepan G., Szalai R., Insperger T.* Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect // Nonlinear dynamics of production systems / ed. by G. Radons, R. Neugebauer. – Weinheim: Wiley, 2004. – P. 111–127. – DOI: 10.1002/3527602585.ch7.
21. *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.
22. Influence of the ploughing effect on the dynamic behavior of the self-vibratory drilling head / H. Paris, D. Brissaud, A. Gouskov, N. Guibert, J. Rech // CIRP Annals. – 2008. – Vol. 57 (1). – P. 385–388.
23. *Altintas Y., Budak E.* Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44 (1). – P. 357–362. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
24. 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. – DOI: 10.1504/IJM-MM.2017.081186.

25. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding // CIRP Annals. – 2004. – Vol. 53 (2). – P. 619–642. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8.

26. Altintas Y. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 310 p. – ISBN 978-0-521-76289-8.

27. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 112. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.

28. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние вибраций на траектории формообразующих движений инструмента при точении // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 42–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-42-58.

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

30. 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: 10.17212/19946309201921.43146.

31. Dornfeld D., Pan S. Determination of chip formation states using the method of linear discriminant functions with acoustic. Blowout // Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference. – Berkeley, California, USA, 1985. – P. 299–303.

32. Application of machine vision for tool condition monitoring and tool performance optimization – a review / T. Banda, A.A. Farid, C. Li, V.L. Jauw, C.S. Lim // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 121 (11–12). – P. 7057–7086. – DOI: 10.1007/s00170-022-09696-x.

33. Munaro R., Attanasio A., Del Prete A. Tool wear monitoring with artificial intelligence methods // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7 (4). – P. 129. – DOI: 10.3390/jmmp7040129.

34. Zhu K., Yu X. The monitoring of micro milling tool wear condition by wear area estimation // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Vol. 93. – P. 80–91. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.02.004.

35. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Молодцов В.В. Диагностика состояния станков по вибрационным характеристикам // Materials. Technologies. Design. – 2020. – Т. 2, № 1 (2). – С. 69–77.

36. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V., Dhande S.G. A method for characterization of machine-tools dynamic parameters for diagnostic purposes // Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – Vol. 53 (3–4). – P. 588–600.

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

38. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

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

40. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов: учебник. – М.: Инновационное машиностроение, 2022. – 304 с.

41. Тавстук А.А., Лютов А.Г., Коуров Г.Н. Применение удельных энергетических параметров при оптимизации и управлении процессом резания // СТИН. – 2014. – № 2. – С. 29–34.

42. Мигранов М.Ш. Исследование изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиции термодинамики и самоорганизации // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65–70.

43. Interrelation between tribosystem evolution and parameters of dynamic friction system / V.L. Zakovorotny, M. Marchak, I.V. Usikov, A.D. Lukyanov // Journal of Friction and Wear. – 1998. – Vol. 19 (6). – P. 54–64.

44. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39 (5). – P. 423–433. – DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

45. 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.

46. Нейронно-сетевое моделирование процесса изнашивания твердосплавного инструмента / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Кузьмишина, Д.А. Шатагин, М.С. Аносов // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75, № 9. – С. 398–402. – DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-398-402.

47. А. с. 657918 СССР. Способ определения оптимальной скорости резания: № 233161/08: заявл. 03.03.76; опубл. 28.04.79, Бюл. № 15 / А.Д. Макаров, Д.И. Рюков, В.М. Коленченко, А.П. Добrorез. – 5 с.

48. Патент № 2535839 С2 Российская Федерация, МПК8 B23B 1/00 (20.12.2014). Способ определения оптимальной скорости резания: № 2013113474/02: заявл. 26.03.2013; опубл. 20.12.2014 / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев.

49. *Закураев В.В., Хадеев С.И.* Оценка условий оптимального режима резания по энергетическим характеристикам процесса. – Новокузнецк: Межотраслевой НТК, 2007. – 187 с.
50. *Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш.* Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. – М.: Машиностроение, 2005. – 202 с.
51. *Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В.* Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.
52. *Lapshin V.P.* Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system // Materials. – 2021. – Vol. 14 (21). – P. 6492. – DOI: 10.3390/ma14216492.
53. *Каширская Е.Н., Орлов А.В.* Определение износа металлорежущего инструмента на основе анализа температуры резания // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1/1. – С. 120–123.
54. *Пантюхин О.В., Васин С.А.* Цифровой двойник технологического процесса изготовления изделий специального назначения // Станкоинструмент. – 2021. – № 1 (22). – С. 56–59.
55. Sandvik Coromant. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com> (дата обращения: 01.06.2021).
56. *Хакен Г.* Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии. – Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2003. – 320 с.
57. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
58. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: Либроком, 2019. – 240 с. – ISBN 978-5-397-03010-6.
59. *Колмогоров А.Н., Фомин С.В.* Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1976. – 543 с.
60. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Основы системно-синергетического анализа и синтеза управления процессом обработки на металлорежущих станках: монография. – СПб.: Лань, 2025. – 436 с. – ISBN 978-5-507-53020-5.
61. *Агапов С.И., Ткаченко И.Г.* Определение оптимальной амплитуды и направления ультразвуковых колебаний при зубодолблении мелко модульных зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2010. – № 2. – С. 48–50.
62. *Андронов А.А., Понтрягин Л.С.* Грубые системы // Доклады Академии наук СССР. – 1937. – Т. 14, № 5. – С. 247–250.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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 -

Metal Working and Material Science

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



Dependence of tool wear on evolutionary changes in parameters of the dynamic cutting system

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

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

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 August 2025

Revised: 02 September 2025

Accepted: 27 June 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

Evolutionary transformations

Dynamic cutting system

Tool wear

Irreversible energy transformations

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZNE-2025-0008).

ABSTRACT

Introduction. A fundamental property of a dynamic cutting system (DCS) is its evolutionary change, caused by irreversible energy transformations in the machining zone. Within this process, the progression of tool wear acts as one of the factors influencing the evolution, while simultaneously being dependent on the state of the DCS. Consequently, wear depends on the parameters of the DCS, and the progression of wear alters the parameters of the dynamic coupling formed by cutting. In this interconnected, and therefore self-organizing, system, the intensity of wear becomes dependent on the initial parameters of the DCS, and the wear trajectory becomes dependent on the initial parameters of the system. However, to date, wear has not been considered as part of an interconnected set of subsystems. **Subject.** This study examines tool wear as an integral part of an evolutionarily changing cutting system, characterized by the interplay between its coordinates and wear. In particular, it investigates the patterns of change in wear trajectories as a function of the initial parameters of the cutting system. The aim of this study is to investigate the effect of irreversible energy transformations on tool wear in order to align it with the parameters of the DCS. **Methods.** This paper presents the results of mathematical modelling of the evolutionary changes in the properties of a DCS, which are determined by the phase trajectory of the power of irreversible energy conversions based on the work done. It examines a DCS model in which wear is described using *Volterra's* equation, discusses the challenges of parameterizing the equations, presents the results of numerical modelling, and provides a practical example. **Results and Discussion.** The results of modelling the relationship between wear and DCS parameters, and control parameters (namely, machining conditions), are presented and discussed. An example is given of how the wear behavior changes during the turning of 0.1 C–1.0 Mn–2.0 Ni–0.3 Cu–0.7 V steel. It is demonstrated that the evolutionary properties of wear can be highly sensitive to small variations in the initial DCS parameters, disturbances, and control parameters. The problem of selecting the optimal cutting speed trajectory based on the work done by the forces is also considered, as well as the use of the developed mathematical tools to create a digital twin of the machining process.

For citation: Gvindjiliya V.E., Zakovorotny V.L. Dependence of tool wear on evolutionary changes in parameters of the dynamic cutting system. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 147–166. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-147-166. (In Russian).

References

1. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision-grinding operations. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1954, vol. 76 (4), pp. 593–597. DOI: 10.1115/1.4014908.
2. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205 (5345), pp. 199–203.
3. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: Contribution to machine-tool chatter research – 1. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87 (4), pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
4. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square,
 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
 Tel.: +7 918 583-23-33, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

5. Tlustý J., Poláček A., Danek C., Spacek J. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen*. Berlin, VerlagTechnik, 1962. 320 p.
6. Gorodetsky Yu.I. Teoriya nelineinykh kolebaniy i dinamika stankov [Theory of nonlinear oscillations and machine tool dynamics]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i optimal'noe upravlenie = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. Series: Mathematical Modeling and Optimal Control*, 2001, no. 2 (24), pp. 69–88.
7. Hanna N.H., Tobias S.A. A theory of nonlinear regenerative chatter. *Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96 (1), pp. 247–255. DOI: 10.1115/1.3438305.
8. 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 (4), pp. 207–221. DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.
9. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2002, vol. 13 (7), pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-x.
10. Grabec I. Chaos generated by the cutting process. *Physics Letters A*, 1986, vol. 117 (8), pp. 384–386.
11. Tlustý J., Ismail F. Basic non-linearity in machining chatter. *CIRP Annals*, 1981, vol. 30 (1), pp. 299–304. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.
12. Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineinye 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.
13. Maksarov V.V., Vasin S.A., Efimov A.E. Dinamicheskaya stabilizatsiya protsessa rastachivaniya vnutrennikh poverkhnostey svarnykh izdeliy [Dynamic stabilization of the boring process of internal surfaces of welded products]. *STIN: stanki, instrument = Russian Engineering Research*, 2021, no. 7, pp. 6–10. (In Russian).
14. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2015, vol. 10, pp. 102–116.
15. Zakovorotny 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.
16. 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 (9), p. 1450115. DOI: 10.1142/S0218127414501156.
17. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modelling of frictional chatter in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 89, pp. 167–176. DOI: 10.1016/j.jmecs.2014.08.020.
18. Insperger T., Stepan G. Semi-discretization method for delayed systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2002, vol. 55 (5), pp. 503–518. DOI: 10.1002/nme.505.
19. 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 (1779), pp. 663–693. DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.
20. Stepan G., Szalai R., Insperger T. Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect. Radons G., Neugebauer R., eds. *Nonlinear dynamics of production systems*. Weinheim, Wiley, 2004, pp. 111–127. DOI: 10.1002/3527602585.ch7.
21. 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.
22. Paris H., Brissaud D., Gousskov A., Guibert N., Rech J. Influence of the ploughing effect on the dynamic behavior of the self-vibratory drilling head. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57 (1), pp. 385–388. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.018.
23. Altintas Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*, 1995, vol. 44 (1), pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
24. Gousskov A., Gousskov 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. DOI: 10.1504/IJMMM.2017.081186.
25. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP Annals*, 2004, vol. 53 (2), pp. 619–642. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8.
26. Altintas Y. *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2012. 368 p. ISBN 978-0-521-76289-8.
27. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 112, pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.



28. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Vliyanie vibratsii na traektorii formoobrazuyushchikh dvizhenii instrumenta pri tochenii [The influence of the vibration on the tool shape-generating trajectories when turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 42–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-42-58. (In Russian)
29. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Dynamic influence of spindle wobble in a lathe on the workpiece geometry. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38 (9), pp. 723–725. DOI: 10.3103/S1068798X18090307.
30. 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. (In Russian).
31. Dornfeld D., Pan S. Determination of chip formation states using the method of linear discriminant functions with acoustic emission. *Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference*, Berkeley, California, USA, May 19–22, 1985, pp. 299–303.
32. Banda T., Farid A.A., Li C., Jauw V.L., Lim C.S. Application of machine vision for tool condition monitoring and tool performance optimization – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121 (11–12), pp. 7057–7086. DOI: 10.1007/s00170-022-09696-x.
33. Munaro R., Attanasio A., Del Prete A. Tool wear monitoring with artificial intelligence methods. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7 (4), p. 129. DOI: 10.3390/jmmp7040129.
34. Zhu K., Yu X. The monitoring of micro milling tool wear condition by wear area estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 93, pp. 80–91. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.02.004.
35. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Molodtsov V.V. Diagnostika sostoyaniya stankov po vibratsionnym kharakteristikam [Diagnostics of the state of machines by vibration characteristics]. *Materials. Technologies. Design*, 2020, vol. 2, no. 1 (2), pp. 69–77. (In Russian).
36. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V., Dhande S.G. A method for characterization of machine-tools dynamic parameters for diagnostic purposes. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 53 (3–4), pp. 588–600. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01786-9.
37. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoi obrabotke* [Synergetics of tool wear in cutting edge treatment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 978-5-7890-1669-5.
38. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 640 p.
39. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
40. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. *Rezanie materialov* [Material cutting]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2022. 304 p.
41. Tavstyuk A.A., Lyutov A.G., Kourov G.N. Primenenie udel'nykh energeticheskikh parametrov pri optimizatsii i upravlenii protsessom rezaniya [Application of specific energy parameters for optimization and control of the cutting process]. *STIN: stanki, instrument = Russian Engineering Research*, 2014, no. 2, pp. 29–34. (In Russian).
42. Migranov M.Sh. Issledovanie iznashivaniya instrumental'nykh materialov i pokrytii s pozitsii termodinamiki i samoorganizatsii [Study of wear of tool materials and coatings from the standpoint of thermodynamics and self-organization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–70. (In Russian).
43. Zakovorotny V.L., Marchak M., Usikov I.V., Lukyanov A.D. Interrelation between tribosystem evolution and parameters of dynamic friction system. *Journal of Friction and Wear*, 1998, vol. 19 (6), pp. 54–64.
44. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39 (5), pp. 423–433. DOI: 10.3103/S1068798X19050204.
45. 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 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.
46. Kabaldin Yu.G., Kuz'mishina A.M., Shatagin D.A., Anosov M.S. Neironno-setevoe modelirovanie protsessa iznashivaniya tverdosplavnogo instrumenta [Neural network modeling of the wear process of a carbide cutting tool].

Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies, 2021, vol. 75, no. 9, pp. 398–402. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-9-398-402. (In Russian).

47. Makarov A.D., Ryukov D.I., Kolenchenko V.M., Dobrorez A.P. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya* [Method for determining optimal cutting speed]. Inventor's Certificate USSR, no. 657918, 1979.

48. Artamonov E.V., Vasil'ev D.V. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya* [Method for determining optimal cutting speed]. Patent RF, no. 2535839, 2014.

49. Zakuraev V.V., Khadeev S.I. *Otsenka uslovii optimal'nogo rezhima rezaniya po energeticheskim kharakteristikam protsessa* [Assessment of optimal cutting conditions based on energy characteristics of the process]. Novokuznetsk, Mezhotraslevoi NTK Publ., 2007. 187 p.

50. Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. *Intensifikatsiya protsessa metalloobrabotki na osnove ispol'zovaniya effekta samoorganizatsii pri trenii* [Intensification of metalworking process based on the use of self-organization effect in friction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 202 p.

51. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. *Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov* [Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibration in metal turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58. (In Russian).

52. Lapshin V.P. Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system. *Materials*, 2021, vol. 14 (21), p. 6492. DOI: 10.3390/ma14216492.

53. Kashirskaya E.N., Orlov A.V. *Opredelenie iznosa metallovezhushchego instrumenta na osnove analiza temperatury rezaniya* [Determination of wear of metal-cutting tools based on analysis of cutting temperature]. *Polzunovskii vestnik = Polzunov Bulletin*, 2012, no. 1/1, pp. 120–123.

54. Pantyukhin O.V., Vasin S.A. *Tsifrovoy dvoynik tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya izdelii spetsial'nogo naznacheniya* [Digital double of the technological process of manufacturing special-purpose products]. *Stankoinstrument = Machine Tools and Tools*, 2021, no. 1 (22), pp. 56–59. DOI: 10.22184/2499-9407.2021.22.1.56.58.

55. Sandvik Coromant: metal cutting tools and machining solutions. Sandvik AB, Sweden. Available at: <https://www.sandvik.coromant.com> (accessed 01.06.2021).

56. Haken H. *Tainy prirody. Sinergetika: uchenie o vzaimodeistvii* [Secrets of nature. Synergetics: the science of interaction]. Izhevsk, Institute of Computer Science Publ., 2003. 320 p. (In Russian).

57. Nicolis G., Prigogine I. *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*. New York, Wiley, 1977 (Russ. ed.: Nikolis G., Prigozhin I. *Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh*. Moscow, Mir Publ., 1979. 512 p.).

58. Kolesnikov A.A. *Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza* [Synergetic methods for controlling complex systems: theory of system synthesis]. Moscow, Librokom Publ., 2019. 240 p. ISBN 978-5-397-03010-6.

59. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsii i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 543 p.

60. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. *Osnovy sistemno-sinergeticheskogo analiza i sinteza upravleniya protsessom obrabotki na metallovezhushchikh stankakh* [Fundamentals of system-synergetic analysis and synthesis of control of the machining process on metal-cutting machine tools]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2025. 436 p. ISBN 978-5-507-53020-5.

61. Agapov S.I., Tkachenko I.G. *Opredelenie optimal'noi amplitudy i napravleniya ul'trazvukovykh kolebaniy pri zubodolblenii melkomodul'nykh zubchatykh kolez* [Determining the optimal amplitudes and directions of ultrasound vibrations in cutting small-module gears]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2010, no. 2, pp. 48–50. (In Russian).

62. Andronov A.A., Pontryagin L.S. *Grubye sistemy* [Rough systems]. *Doklady Akademii nauk SSSR = Soviet Mathematics. Doklady*, 1937, vol. 14, no. 5, pp. 247–250. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 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>).