



Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий резания в процессе выполнения технологических операций

О.А. Ерзин^{1✉}, С.А. Васин², А.С. Клентак³

^{1,2}Тулский государственный университет, Тула, Россия

³Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Резюме. Цель – оптимизация условий резания путем управления кинематическими углами режущего инструмента при обработке фасонных поверхностей и технологически обусловленном изменении режимных параметров процесса резания. Объектом исследований явились условия резания при обработке фасонных поверхностей, их влияние на режимные параметры процесса резания, кинематические углы режущего инструмента (передний и главный в плане) и наклона режущей кромки. При построении математических моделей использовались методы теории резания, теоретической механики и термодинамики. Проведенный анализ геометрии лезвия режущего инструмента как в статике, так и в кинематике показал, что изменение угловых координат передней поверхности лезвия при различных условиях резания в процессе выполнения технологических операций требует внедрения управляемых осей поворота. Эти оси должны регулировать основные углы лезвия: главный, передний и угол наклона режущей кромки. При заглублении инструмента более 85% кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки. Предложено ввести управляемые оси поворота передней поверхности лезвия режущего инструмента по ее основным углам: главному, переднему и углу наклона режущей кромки. Показано, что кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки. Выявлено, что данные углы конструктивно ограничивают диапазон регулирования переднего угла режущего инструмента в связи с недопустимым уменьшением заднего угла, необходим их учет при расчете силовых характеристик процесса резания. Таким образом, для решения проблемы стабилизации кинематических углов режущего инструмента нужно разрабатывать новые методы и технологии, которые позволят более точно контролировать кинематические параметры в процессе резания. Важно учитывать влияние различных факторов, таких как материал обрабатываемой детали, тип режущего инструмента и режимы резания.

Ключевые слова: управление кинематическими углами, режущий инструмент, обработка, фасонные поверхности, параметры процесса резания, оптимизация, условия резания

Для цитирования: Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С. Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий резания в процессе выполнения технологических операций // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 22–32. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-22-32>. EDN: HIESRX.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological operations under different cutting conditions

Oleg A. Erzin^{1✉}, Sergey A. Vasin², Anna S. Klentak³

^{1,2}Tula State University, Tula, Russia

³Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Abstract. This study aims to optimize cutting conditions by controlling the working angles of cutting tools when machining shaped surfaces and changing operating parameters of the cutting process for technological reasons. The study object includes cutting conditions for machining shaped surfaces, their influence on the

operating parameters of the cutting process, the working angles of cutting tools (rake angle and lead angle), and cutting edge inclination. When developing mathematical models, we used methods of the theory of cutting, analytical mechanics, and thermodynamics. Static and kinematic geometry analysis of a blade in a cutting tool showed that changes in the angular coordinates of the front surface of a blade require the introduction of controlled rotation axes when conducting technological operations under different cutting conditions. These axes should control the main blade angles, i.e., lead angle, rake angle, and cutting edge inclination. With more than 85% of the tool penetration, the working angles considerably change even when its installation errors are relatively small. It is proposed to introduce controlled rotation axes of the front surface of a blade in a cutting tool by its main angles, i.e., lead angle, rake angle, and cutting edge inclination. It is shown that working angles considerably change even when its installation errors are relatively small. The study revealed that these angles constructively limit the regulation range of the rake angle of a cutting tool due to the impermissible reduction of the back relief angle; these angles should be taken into account when calculating the power characteristics of the cutting process. Thus, in order to solve the problem of stabilizing the working angles of cutting tools, new methods and technologies should be developed, which would make it possible to control kinematic parameters in the cutting process more accurately. It is important to take into account the influence of various factors such as workpiece material, cutting tool type, and cutting conditions.

Keywords: kinematic angle control, cutting tool, machining, profiled surfaces, cutting process parameters, optimization, cutting conditions

For citation: Erzin O.A., Vasin S.A., Klentak A.S. Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological operations under different cutting conditions. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):22-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-22-32>. EDN: HIESRX.

ВВЕДЕНИЕ

Управляемые координаты в металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ) решают задачи формообразования поверхностей обрабатываемых деталей или настроечных перемещений. Режимы резания определяются скоростями резания и перемещений по управляемым координатам, а также величиной снимаемого припуска, которая в общем случае также зависит от направлений этих скоростей, определяющих сечение срезаемого слоя. Координаты инструмента – положение режущей кромки в системе координат станка или детали считаются неизменными и задаются корректорами в ЧПУ.

Геометрия лезвия режущего инструмента описывается в статической и кинематической системах координат. Известно, что основные угловые характеристики инструмента [1, 2] определяют положение его передней поверхности относительно векторов скоростей резания и подачи. В процессе обработки они могут изменяться, например, в соответствии с контуром обрабатываемой поверхности или скорости резания, в этом случае они называются кинематическими [3–7]. Данный факт позволяет рассматривать режущий инструмент как сложную многокоординатную инструментальную систему (ИС) [8].

В проведенных ранее исследованиях [9] отмечены специфические закономерности, отражающие особенности токарных операций отрезки: изменение переднего угла при-

водит к уменьшению нормальной составляющей силы стружкообразования, а момент поворота режущего клина вокруг режущей кромки, обусловленный действием этой силой, носит экстремальный характер. В то же время значения момента поворота режущего клина относительно режущей кромки незначительны и указывают на высокую энергоэффективность управления его передним углом.

В исследованиях [10–12], в зависимости от профиля обрабатываемой детали, показаны различные варианты расположения центра поворота резца и для управления главным углом в плане и передним углом резца. Предложено в систему координат инструмента ввести две переносные цилиндрические системы управляемых координаты.

В исследованиях [13] установлено, что устройство управления процессом резания по переднему углу режущего клина технически реализуемо.

На рис. 1 представлена система координат инструмента и их взаимосвязи [1, 4, 6]. В соответствии с известными определениями, на рис. 1 показаны:

- основная плоскость – плоскость $O_P X_P Y_P$;
- плоскость резания – касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости;
- поперечная плоскость – плоскость $O_P X_P Z_P$;
- главная секущая плоскость – плоскость, перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость.

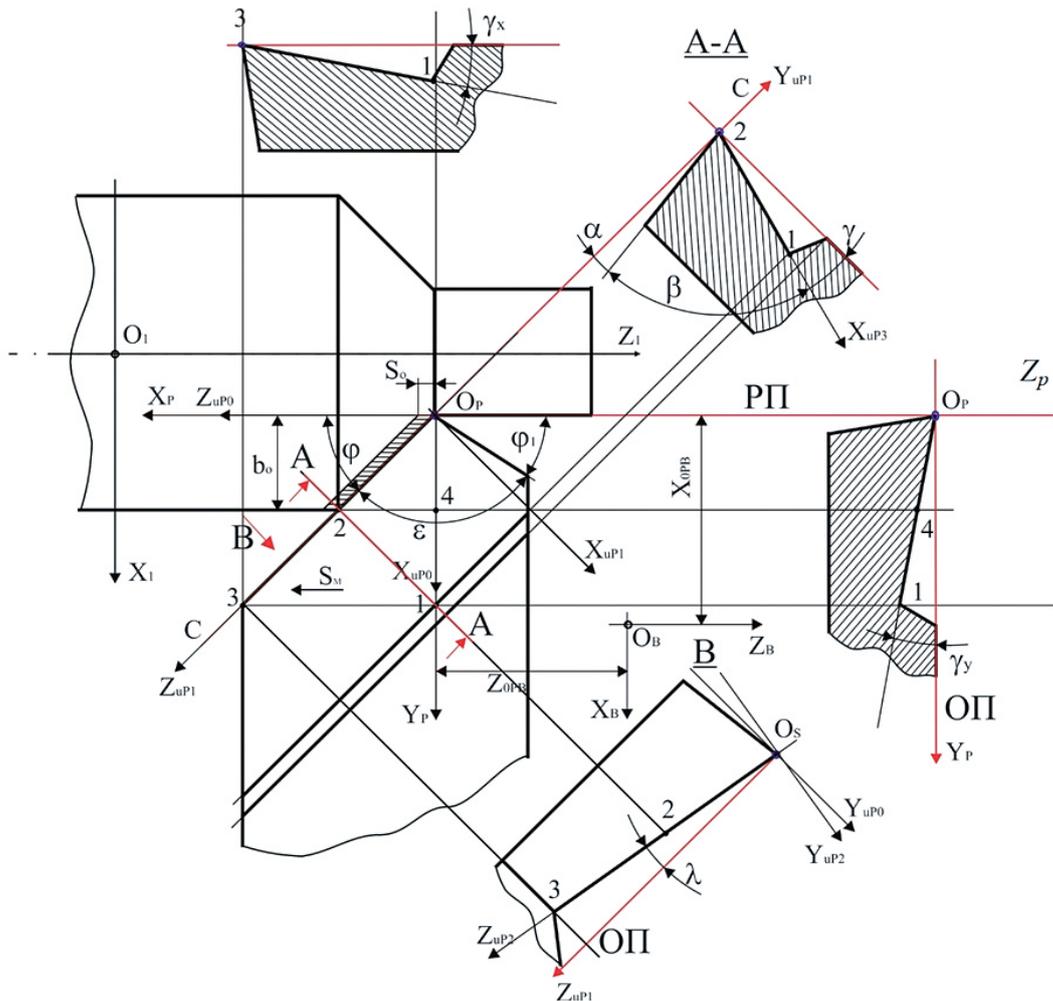


Рис. 1. Системы координат инструмента и их взаимосвязи: C-C – статическая плоскость резания; A-A – главная секущая плоскость резания

Fig. 1. Tool coordinate systems and their relationships: C-C – static cutting plane; A – main cutting secant plane

Известно, что условия резания в значительной степени определяются по передней поверхности лезвия ИС. Она характеризуется формой, режущими кромками и вершиной. Положение этой поверхности относительно скорости резания определяет условия резания, технологические возможности и показатели операций, связанных с отделением припуска от заготовки [2–7].

К основным углам лезвия ИС, определяющим положение его передней поверхности, относятся передний угол γ , главный угол в плане φ , угол наклона режущей кромки λ [1, 2]. Соответственно, это:

- угол между основной плоскостью и линией пересечения передней поверхности с главной секущей плоскостью;

- наименьший угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и поперечной плоскостью;

- угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью (расположен в плоскости резания).

В качестве примера различных видов геометрии лезвия ИС на рис. 2 приведены схемы продольного точения и отрезки.

Сечение срезаемого слоя определяет основные характеристики процесса стружкообразования и мощность резания:

$$a_1 \cdot b_1 = S_0 \cdot t_p; a_1 = S_0 \cdot \sin \varphi; b_1 = \frac{t_p}{\sin \varphi};$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - (\beta + \gamma); \varphi_1 = \pi - (\varphi + \varepsilon_k), \quad (1)$$

где a_1, b_1 – толщина и ширина среза, м; S_0, t_p – подача на оборот и глубина резания, м; $\varphi, \varphi_1, \varepsilon_k$ – углы в плане: главный, вспомогательный и при вершине резца, °; γ, α, β – передний, задний углы и угол заострения, °.

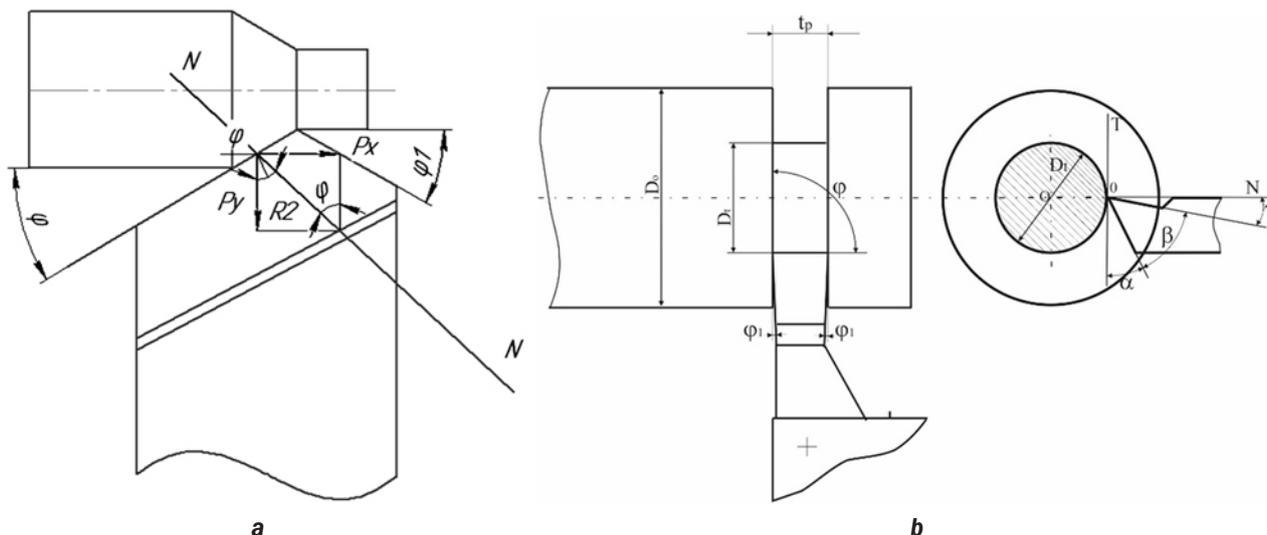


Рис. 2. Схемы токарной обработки: а – продольное точение; б – отрезка и прорезка канавок
 Fig. 2. Turning diagrams: a – longitudinal turning; b – cutting and grooving

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью является оптимизация условий резания путем управления кинематическими углами режущего инструмента при обработке фасонных поверхностей и технологически обусловленном изменении режимных параметров процесса резания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нарушение стационарности процесса резания влияет на все технологические параметры операций точения и обусловлено множеством факторов, которые могут иметь как стохастический, так и детерминированный характер. Стохастические факторы связаны с колебаниями припуска на обработку, параметрами режима реза-

ния, а также характеристиками заготовок, инструмента и оборудования. К детерминированным факторам относятся технологически predetermined изменения скорости резания, что особенно актуально для операций, таких как отрезка, прорезка канавок, подрезка торца или поперечное точение [4, 6, 7, 9], или направления вектора подачи при фасонном точении [4, 6, 7, 10]. К ним в том числе следует отнести изменение кинематических углов лезвия ИС в зависимости от его установки, показанное на рис. 3 [6, 9].

Кинематические углы вычисляются на основе известных геометрических принципов соотношений следующим образом [6] (на рис $d\gamma, h$):

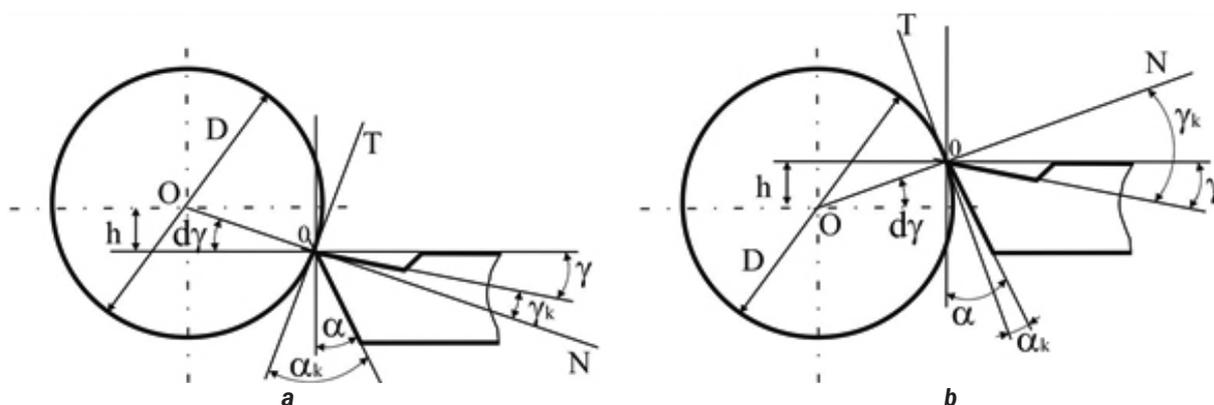


Рис. 3. Влияние положения режущей кромки реза относительно линии центров на его передний и задний кинематические углы: а – ниже центров; б – выше центров; О-Т – плоскость резания; О-Н – линия, проходящая через ось вращения заготовки и точку пересечения режущей кромкой секущей плоскости

Fig. 3. Effect of the cutter cutting edge position relative to the center line on its front and rear kinematic angles: a – below the centers; b – above the centers; O-T – cutting plane; O-N – line passing through the workpiece rotation axis and the intersection point of the cutting edge and the cutting plane

$$\gamma_k = \gamma + d\gamma_{ky} + d\gamma_{kV}; \alpha_k = \frac{\pi}{2} - (\beta + \gamma_k);$$

$$\varphi_k = \varphi - d\varphi_{kF}; \varphi_{1k} = \pi - (\varphi_k + \varepsilon_k);$$

$$d\varphi_{kF} = \arctg(F_x/F_z); d\gamma_{ky} = \arcsin(2h_{p=}/D_t);$$

$$d\gamma_{kV} = \text{arccctg} \left(\frac{v}{S_0 \cdot n_q \cdot \sin \theta_{VS}} + \text{ctg} \theta_{VS} \right), \quad (2)$$

для отрезки $\theta_{VS} = -\frac{\pi}{2} - d\gamma_{ky}$;

$$D_t = D_0 - S_0 \cdot n \cdot t = D_0(1 - T_{otn});$$

$$T_{otn} = \frac{t}{t_k}; t_k = \frac{D_0}{2 \cdot S_0 \cdot n_q},$$

где $\gamma_k, \alpha_k, \varphi_k, \varphi_{1k}$ – кинематические углы лезвия ИС: передний и задний, а также главный и вспомогательный в плане соответственно, °; $d\gamma_{ky}, d\gamma_{kV}$ – изменение переднего кинематического угла, вызванное ошибками установки инструмента и колебаниями скорости резания; $d\varphi_{kF}$ – изменение главного кинематического угла в плане, обусловленное изменением соотношения составляющих подачи по координатным осям F_x, F_x, F_x, F_z , θ_{VS} – угол между векторами скорости резания и результирующей подачи, °; $h_{p=}, D_0, D_t$ –

погрешность установки резца, начальное и текущее значение диаметра заготовки в процессе отрезки, м; T_{otn} – относительное время выполнения операции; n_q – скорость вращения заготовки, c^{-1} .

Например, по ходу операций отрезки и прорезки канавок, уменьшение скорости резания, вызванное изменением диаметра обрабатываемой поверхности, является причиной существенного изменения условий резания, связанного с уменьшением скорости резания:

$$V_P = V_0(1 - T_{otn}); V_0 = \frac{C_v}{T_P^{xt} \cdot S_0^{xs}}, \quad (3)$$

где V_0 – рекомендованное значение скорости резания при выполнении операций отрезки и прорезки канавок, м/мин; T_P – период стойкости резца, мин; C_v, xt, xs – постоянные коэффициенты^{4,5}.

На операции отрезки в процессе заглабления инструмента в заготовку без учета уменьшения скорости резания, изменение кинематических углов лезвия ИС при $\gamma = 10^\circ, \beta = 58^\circ$ и различных значениях погрешности его установки приведены на рис. 4.

Из приведенных зависимостей видно, что при заглаблении инструмента

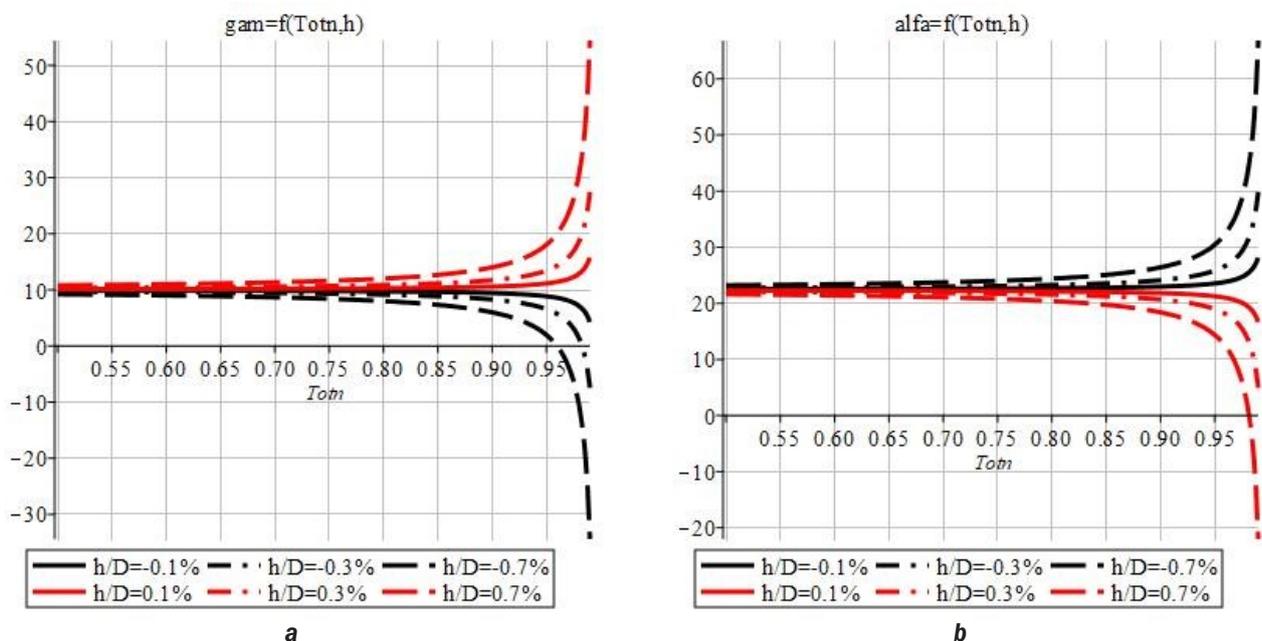


Рис. 4. Зависимости переднего (а) и заднего (б) углов лезвия инструментальной системы от величины заглабления при различных значениях погрешности его установки (красные линии $h/D > 0$, черные линии $h/D < 0$)

Fig. 4. Dependences of the front (a) and rear (b) tool edge angles on the penetration depth at different values of the tool installation error (red lines $h/D > 0$, black lines $h/D < 0$)

⁴Ачеркан Н.С. Справочник металлиста. В 5 т; т. 4. М.: Машгиз, 1959. 778 с.

⁵Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроения. В 2-х т; т. 1. М.: Машиностроение, 1990. 495 с.

$(D_0 - D_t)/D_0 = T_{отн}$ более 85% кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки. Причем погрешность установки инструмента конструктивно ограничивает диапазон регулирования переднего угла режущего инструмента ввиду недопустимого уменьшения заднего угла. Это явление требует учета при расчете силовых характеристик процесса резания [14–16].

Следует отметить, что, исходя из конструктивных соотношений при вариациях кинематических углов переднего и главного в плане, углы заострения и при вершине в плане резца остаются неизменными.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Взаимосвязь между основными углами лезвия ИС определяется из известных геометрических соотношений [6, 11, 12] рис. 1:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\gamma_y &= \cos\varphi \cdot \operatorname{tg}\gamma - \sin\varphi \cdot \operatorname{tg}\lambda; \\ \operatorname{tg}\gamma_x &= \sin\varphi \cdot \operatorname{tg}\gamma + \cos\varphi \cdot \operatorname{tg}\lambda, \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\gamma &= \sin\varphi \cdot \operatorname{tg}\gamma_x + \cos\varphi \cdot \operatorname{tg}\gamma_y; \\ \operatorname{tg}\lambda &= \cos\varphi \cdot \operatorname{tg}\gamma_x - \sin\varphi \cdot \operatorname{tg}\gamma_y, \end{aligned}$$

где γ_y, γ_x – углы, образуемые между передней поверхностью резца и основной плоскостью в продольном и поперечном сечениях, ° (см. рис. 1).

Данная взаимосвязь представлена на рис. 5, где показано, что в исследуемом диапазоне изменения переднего угла (γ) и угла наклона режущей кромки (λ) зависимости (4) могут быть преобразованы в линейные и представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_y &= \gamma \cdot \cos\varphi - \lambda \cdot \sin\varphi; \\ \gamma_x &= \gamma \cdot \sin\varphi + \lambda \cdot \cos\varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

При изменении этих углов в традиционном диапазоне $\lambda = \pm 10^\circ$ и $\lambda = \pm 15^\circ$ погрешности аппроксимации тригонометрических выражений (4) рядами (5) достигают максимальных значений при $\varphi = 45^\circ$ и не превышают 1,6%. Указанного вполне достаточно для оценки характера поведения этих зависимостей.

Из них видно, при $\varphi > 45^\circ$ угол наклона зависимости $\gamma_y = f(\gamma)$ больше, чем $\gamma_x = f(\gamma)$, а при $\varphi < 45^\circ$ – наоборот. При возрастании φ у зависимости $\gamma_x = f(\gamma)$, он увеличивается, а у $\gamma_y = f(\gamma)$ уменьшается, причем более интенсивно.

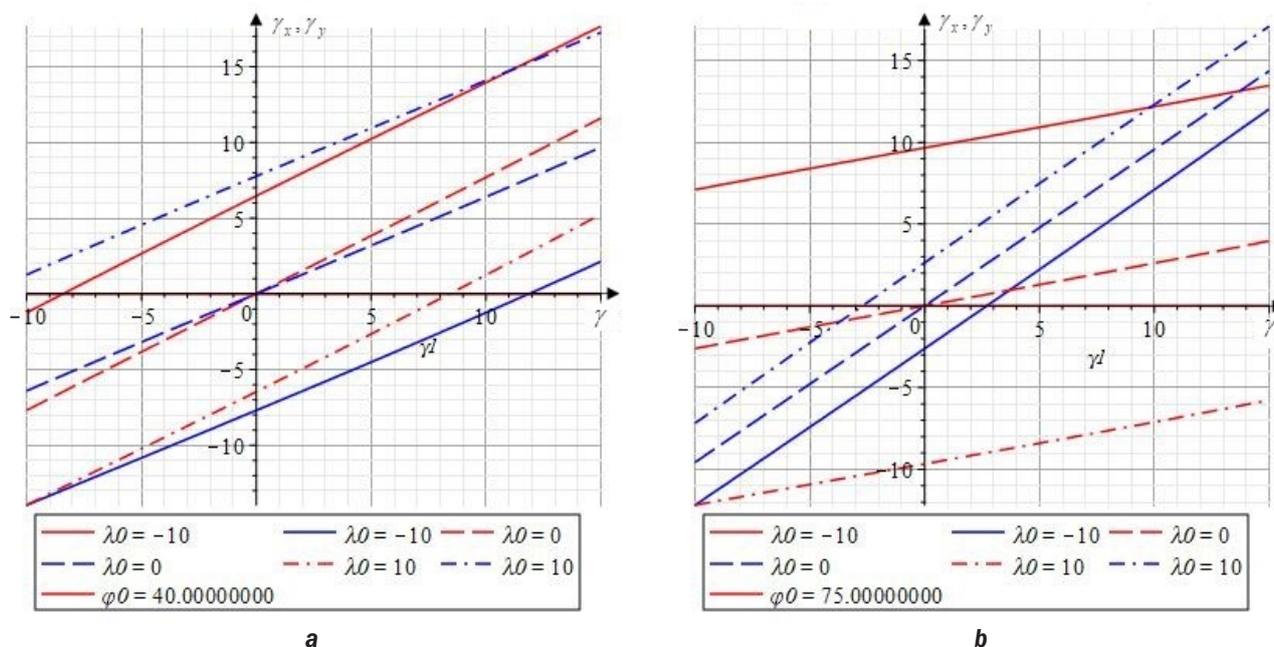


Рис. 5. Зависимости углов между передней поверхностью и основной плоскостью в продольном и поперечном сечениях (γ_y, γ_x) от основных углов лезвия инструментальной системы (φ, λ, γ) (γ_y – красные линии, γ_x – синие линии): $a-\varphi = 40^\circ$; $b-\varphi = 75^\circ$

Fig. 5. Dependences of the angles between the front surface and the main plane in longitudinal and transverse sections (γ_y, γ_x) on the main angles of the tool system edge (φ, λ, γ): (γ_y – red lined, γ_x – blue lines): $a-\varphi = 40^\circ$; $b-\varphi = 75^\circ$

При $\varphi < 45^\circ$ его влияние меняется на противоположное. Угол λ практически не оказывает влияния на углы наклона зависимостей $\gamma_x = f(\gamma)$ и $\gamma_y = f(\gamma)$. Его изменение от $\lambda = -10^\circ$ до $\lambda = +10^\circ$ приводит к их параллельному смещению для $\gamma_y = f(\gamma)$ в отрицательном направлении, а для $\gamma_x = f(\gamma)$ – в положительном.

Представляет интерес сравнительная оценка изменения этих углов, например $\Delta\gamma_{xy} = \gamma_x - \gamma_y$. Она иллюстрирует вышесказанное, определяет преимущественное направление движения стружки и представлено на рис. 6 а. В частности, можно видеть, что изменение φ приводит к изменению интенсивности преобладания одного из углов $\gamma_y = f(\gamma)$ или $\gamma_x = f(\gamma)$ в зависимости от переднего угла.

Интересно, что исходя из зависимостей (5) может быть получен некоторый аналог модуля вектора в плоскости γ_x и γ_y $R_{angl} = \sqrt{\gamma_y^2 + \gamma_x^2} = \sqrt{\lambda^2 + \gamma^2}$. Он не зависит в явном виде от переднего угла в плане φ . Это позволяет с точки зрения управляе-

мых координат инструментальной системы (УОИС) рассматривать его как первую поворотную управляемую ось (УО). Фаза вектора R_{angl} определяется также из (5): $\varphi_{angl} = arctg(\gamma_y/\gamma_x) = arctg\left(\frac{\gamma - \lambda \cdot tg\varphi}{\gamma \cdot tg\varphi + \lambda}\right)$. При постоянных значениях γ и λ фазовая характеристика представляет собой дугу окружности, положение которой и ее центральный угол зависят от φ .

Тогда фазовые характеристики в координатах $\gamma_y f(\gamma, \lambda, \varphi)$, $\gamma_x f(\gamma, \lambda, \varphi)$ при изменении φ от 25° до 90° представляют собой концентрические окружности (см. рис. 6 б). Можно видеть, что характеристики для углов $\lambda = 10^\circ$ идентичны характеристикам для $\lambda = -10^\circ$, повернутым на 180° , а фазовая характеристика при $\lambda = 0^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$ вырождается в ноль. Это указывает на тесную их взаимосвязь с точки зрения выбора УО поворота лезвия ИС и следует из очевидных соотношений: при $\varphi = 90^\circ$ $\gamma_y = -\lambda$, $\gamma_x = \gamma$; при $\varphi = 0^\circ$ $\gamma_y = \gamma$, $\gamma_x = \lambda$; при $\varphi = 45^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$ $\gamma_y = 0,707 \cdot (\gamma - \lambda)$, $\gamma_x = 0,707 \cdot (\gamma + \lambda)$.

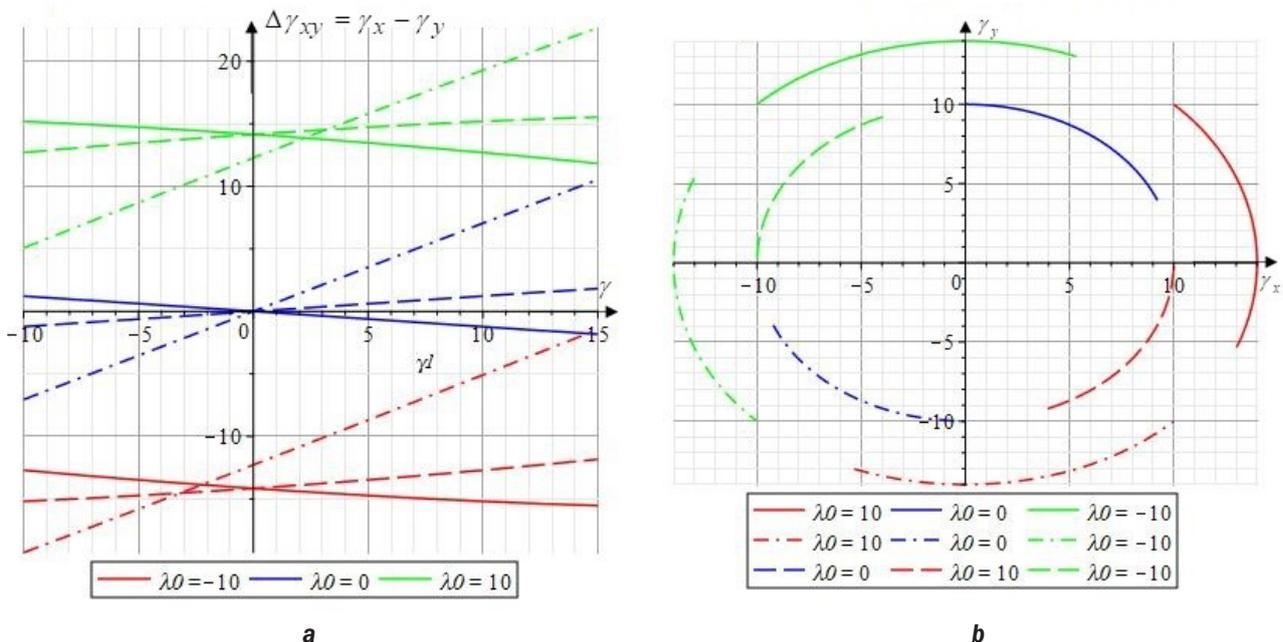


Рис. 6. Зависимость относительного изменения углов наклона передней поверхности ($\Delta\gamma_{xy}$) от основных углов лезвия инструментальной системы (а) ($\varphi = 40^\circ$ – сплошная линия, $\varphi = 50^\circ$ – пунктирная линия, $\varphi = 90^\circ$ – пунктирная линия с точкой); фазовые характеристики углов (б) между передней поверхностью и основной плоскостью в продольном и поперечном сечениях γ_x и γ_y ($\gamma = 10^\circ$ – сплошная линия, $\gamma = 0^\circ$ – пунктирная линия, $\gamma = -10^\circ$ – пунктирная линия с точкой)

Fig. 6. Dependence of relative variation of front surface ($\Delta\gamma_{xy}$) inclination angles on the main angles of the tool system edge (а) ($\varphi = 40^\circ$ – solid line, $\varphi = 50^\circ$ – dashed line, $\varphi = 90^\circ$ – dashed line with a point); phase characteristics of angles (б) between the front surface and the main plane in longitudinal and transverse sections γ_x and γ_y ($\gamma = 10^\circ$ – solid line, $\gamma = 0^\circ$ – dashed line, $\gamma = -10^\circ$ – dashed line with a point)

Проведенный анализ показал, что несмотря на определенные достижения в управлении кинематическими углами режущего инструмента, задача их стабилизации при обработке фасонных поверхностей [10] и технологической обусловленности изменения режимных параметров процесса резания [9, 14, 15–20] остается весьма актуальной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использование поворотных систем координат для управления кинематическими углами лезвия ИС ставит вопрос о рациональном выборе центра поворота [10]. Критерием оптимальности являются характер и количество необходимых дополнительных движений, допустимые их скорости и ускорения. Неудачный выбор центра поворота может привести к принципиальной неосуществимости формообразования некоторых поверхностей или процесса обработки с заданной контурной скоростью подачи [10]. Это связано с невозможностью обеспечить однозначность положения режущей кромки относительно оси поворота лезвия ИС для различных условий резания и сопровождается снижением точности и ухудшением качества поверхности. Поэтому в основу предлагаемого подхода положено требование совмещения начала всех осей поворота режущей кромки и передней поверхности с вершиной ИС.

Такой подход позволяет на основании рассмотренных выше определений углов лезвия ИС выбрать систему УО. Исходя из известных определений [2, 5, 6] и приведенных выше рассуждений можно видеть, что определенные трудности в его реализации связаны с традиционно принятыми разными направлениями координатных осей в ИС и металлорежущих станках.

В станках с ЧПУ система координат инструмента предназначена для определения положения его настроечной точки, в частности вершины резца, в системе координат, например детали $O_1X_1Z_1$ (см. рис. 1). Технически она задается относительно нулевой точки инструментального блока O_B . Его оси координат блока $O_BX_BY_BZ_B$ параллельны осям стандартной системы координат станка и направлены в одну и ту же сторону.

Лезвие ИС характеризуется положением его вершины и режущих кромок в системе

координат, связанной с ее основной плоскостью и вершиной $O_PX_PY_PZ_P$. Вершина задается радиусом скругления r и координатами X_{OPB} , Z_{OPB} его центра в системе координат $O_BX_BY_BZ_B$ инструментального блока (см. рис. 1). Они переводятся в систему координат станка через его базовую точку O_B .

Как отмечено выше, положение главной режущей кромки (резца) лезвия ИС помимо главного угла в плане φ задается углом ее наклона к основной плоскости λ и доопределяет, таким образом, положение его передней поверхности. Это обуславливает необходимость принятия в качестве второй управляемой координаты угол поворота λ вокруг оси O_PX_{up1} , проходящей через вершину лезвия ИС перпендикулярно режущей плоскости. Для однозначного задания положения передней поверхности очевидно в качестве третьей управляемой координаты должен выступать передний угол γ , определяемый осью поворота O_PZ_{up2} , проходящей по режущей кромке лезвия ИС (см. рис. 1).

УОИС будем обозначать по аналогии с УО станков с ЧПУ токарной группы. Плоскость, образованная скоростями подач станка $O_PX_{up0}Z_{up0}$, совпадает со статической основной плоскостью ИС $O_PX_PY_P$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выполнен анализ предметной области описания геометрии лезвия режущего инструмента в статике и кинематики. В результате анализа изменения угловых координат передней поверхности при изменении условий резания в процессе выполнения технологических операций предложено ввести управляемые оси поворота передней поверхности лезвия режущего инструмента по ее основным углам: главному, переднему и углу наклона режущей кромки.

Показано, что кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки, и они конструктивно ограничивают диапазон регулирования переднего угла режущего инструмента в связи с недопустимым уменьшением заднего угла и требуют их учета при расчете силовых характеристик процесса резания.

Несмотря на определенные достижения в управлении кинематическими углами режущего инструмента, задача их стабилиза-

ции при обработке фасонных поверхностей и технологически обусловленном изменении режимных параметров процесса резания остается весьма актуальной.

Список источников

1. Кабалдин Ю.Г., Башков А.А. Самоорганизация и механизм трения при резании // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 2. С. 167–173. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173>. EDN: QPEWOW.
2. Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>. EDN: PATDRX.
3. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. М.: Машгиз, 1962. 150 с.
4. Бобров В.Ф., Грановский Г.И., Зорев Н.Н., Исаев А.И., Клушин М.И., Ларин М.Н. [и др.]. Развитие науки о резании металлов. М.: Машиностроение, 1967. 416 с. EDN: XVPBFT.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
6. Вульф А.М. Резание металлов. Л.: Машиностроение, 1973. 496 с.
7. Телешевский В.И., Соколов В.А. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 33–37.
8. Кузнецов А.П. Тепловое поведение и точность металлорежущих станков: монография. М.: Янус-К, 2011. 255 с. EDN: QNCVON.
9. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Перспективы управления передним углом режущего клина при технологической обусловленности изменения скорости резания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 276–284. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-276-277>. EDN: RVCVLJ.
10. Ерзин О.А., Шадский Г.В., Шаталов Д.Д. Управление кинематическими углами резца в зависимости от профиля обрабатываемой детали // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 494–501. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-494-495>. EDN: INPCGN.
11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect // Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference (Rostov-on-Don, 9–11 September 2023). Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc., 2023. Vol. 2507. Iss. 1. P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
12. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 356 с.
13. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента с управляемым передним углом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 400–406. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-400-406>. EDN: IECIWG.
14. Шадский Г.В., Сальников В.С., Ерзин О.А. Анализ технических возможностей кинематическими углами режущего клина при точении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. С. 360–367. EDN: AZLAUI.
15. Шадский Г.В., Сальников В.С., Ерзин О.А. Перспективы управления кинематическими углами режущего клина на операциях точения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 342–349. EDN: PLHGSV.
16. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Техническое решение отрезного резца с управляемым передним углом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 3–6. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-2-3-4>. EDN: YTQRUQ.
17. Евсеев Л.Л. Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов // Вестник машиностроения. 1995. № 12. С. 3–7.
18. Евсеев Л.Л. Расчет оптимальной скорости резания по коэффициенту динамичности процесса стружкообразования // Станки. Инструмент. 1994. № 4. С. 41–43.
19. Волков Д.И., Проскураков С.Л. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Машиностроение. 2011. Т. 15. № 3. С. 72–78. EDN: PWTNTV.
20. Рыжкин А.А., Климов М.М., Сергеев Р.В. Особенности стружкообразования при обработке сталей твердыми сплавами с износостойкими покрытиями // Вестник Донского государственного технического университета. 2001. Т. 1. № 1. С. 47–53. EDN: SXQCTB.

References

1. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and friction mechanism under cutting. *Russian Engineering Research*. 2023;102(2):167-173. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173>. EDN: QPEWOW.

2. Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Schetin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials & Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>. EDN: PATDRX.
3. Bobrov V.F. *Effect of tool main cutting edge inclination angle on metal cutting*. Moscow: Mashgiz; 1962, 150 p. (In Russ.).
4. Bobrov V.F., Granovskij G.I., Zorev N.N., Isaev A.I., Klushin M.I., Larin M.N., et al. *Development of the science of cutting metals*. Moscow: Mashinostroenie; 1967, 416 p. (In Russ.). EDN: XVPBFT.
5. Bobrov V.F. *Fundamentals of the theory of metal cutting*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.).
6. Wolf A.M. *Metal cutting*. Leningrad: Mashinostroenie; 1973, 496 p. (In Russ.).
7. Teleshevskij V.I., Sokolov V.A. Laser correction of geometric errors of multi-coordinate systems with software control. *Measurement technology*. 2012;5:33-37. (In Russ.).
8. Kuznetsov A.P. *Thermal behavior and accuracy of metal-cutting machines*. Moscow: Yanus-K; 2011, 255 p. (In Russ.).
9. Salnikov V.S., Shadsky G.V., Erzin O.A. Analysis of technical capabilities by kinematic angles of cutting wedge at turning. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2023;12:276-284. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-276-277>. EDN: RVCVLJ.
10. Erzin O.A., Shadsky G.V., Shatalov D.D. Control of cutter kinematic angles depending on machined part profile. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2024;8:494-501. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-494-495>. EDN: INPCGN.
11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect. In: *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference*. 9–11 September 2023, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc.; 2023, vol. 2507, Iss. 1, p. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
12. Bezyazychnyj V.F. *Similarity method in mechanical engineering technology*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2021, 356 p. (In Russ.).
13. Salnikov V.S., Shadsky G.V., Erzin O.A. Analysis of the design solution of an intelligent cutting tool with a controlled front angle. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2022;10:400-406. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-400-406>. EDN: IECIWG.
14. Shadsky G.V., Salnikov V.S., Erzin O.A. Analysis of technical capabilities by kinematic angles of cutting wedge at turning. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2019;12:360-367. (In Russ.). EDN: AZLAUI.
15. Shadsky G.V., Salnikov V.S., Erzin O.A. Prospects of control of kinematic angles of cutting wedge at turning operations. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2019;12:342-349. (In Russ.). EDN: PLHGSV.
16. Salnikov V.S., Shadsky G.V., Erzin O.A. Technical solution of a cutting turning tool with a controlled front angle. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2024;2:3-6. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-2-3-4>. EDN: YTQRUQ.
17. Evseev L.L. *Initial provisions and dependencies for calculating metal cutting dynamics characteristics*. *Russian Engineering Research*. 1995;12:3-7. (In Russ.).
18. Evseev L.L. Calculating optimal cutting speed based on chip formation dynamic coefficient. *Machines and Tooling*. 1994;4:41-43. (In Russ.).
19. Volkov D.I., Proskuryakov S.L. Development of process models including cutting cycle formation CHIP. *Vestnik UGATU*. 2011;15(3):72-78. EDN: PWTNTV. (In Russ.).
20. Ryzhkin A.A., Klimov M.M., Sergeev R.V. Chip formation features during steel processing by hard alloys with wear-resistant coatings. *Vestnik of Don State Technical University*. 2001;1(1):47-53. (In Russ.). EDN: SXQCTB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Erzin Олег Александрович,

к.т.н.,
доцент кафедры «Промышленная
автоматика и робототехника»,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия
✉ erzin79@mail.ru

Vasin Сергей Александрович,

д.т.н., профессор,
профессор-консультант кафедры
«Технология машиностроения»,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия
vasin_sa53@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Erzin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Industrial
Automation and Robotics,
Tula State University,
92, Lenina pr., Tula 300012, Russia
✉ erzin79@mail.ru

Sergey A. Vasin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor-Consultant of the Department
of Mechanical Engineering Technology,
Tula State University,
92, Lenina pr., Tula 300012, Russia
vasin_sa53@mail.ru

Клентак Анна Сергеевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Теплотехника и тепловые
двигатели»,
Самарский национальный исследовательский
университет имени акад. С.П. Королёва,
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, Россия
anna_klentak@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6311-1769>

Anna S. Klentak,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Thermal Engineering and Heat Engines,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev,
34, Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russia
anna_klentak@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6311-1769>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.12.2024 г.; одобре-
на после рецензирования 02.02.2025 г.; принята к
публикации 28.02.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 25.12.2024; approved
after reviewing 02.02.2025; accepted for publication
28.02.2025.