

УДК 621.941
DOI 10.17513/snt.40835



CC BY 4.0

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА СОСТАВ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИПУСКА ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ С УСИЛЕННЫМ СВАРНЫМ ШВОМ

Фоминов Е. В. ORCID ID 0000-0002-0165-7536

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация, e-mail: fominoff83@mail.ru

Статья посвящена определению условий возникновения различного состава срезаемого слоя при точении цилиндрической поверхности заготовки, содержащей сварной шов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности процесса механической обработки сварных изделий при условии удаления припуска с переменными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами. Цель исследования – определить условия изменения состава комбинированного припуска в зависимости от геометрических параметров технологической системы при точении заготовки с усиленным сварным швом. Исследована технологическая система при продольном наружном точении заготовки, состоящей из двух частей, соединенных сварным швом с усилением. Рассмотрены три основных возможных варианта состава срезаемого слоя: двухкомпонентный цельный, двухкомпонентный раздельный и трехкомпонентный цельный. Для определения условий возникновения каждого из вариантов в зависимости от сочетания геометрических параметров системы использованы методы математического моделирования. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить условия возникновения различных видов срезаемого слоя. На основе анализа областей параметров, удовлетворяющих данным условиям, установлено, что в большинстве конфигураций технологических систем будет преобладать вариант двухкомпонентного цельного припуска. Разделение двухкомпонентного припуска возможно при значениях угла в плане менее 45° и обработке длинных сварных швов с малой высотой усиления. Также при точении протяженных сварных участков при малой глубине резания инструментом с низкими значениями угла в плане, будет иметь место обработка трех материалов заготовки одновременно (вариант трехкомпонентного цельного припуска). Полученные в данной работе аналитические зависимости могут быть использованы как предварительный геометрический этап для последующего расчета критических силовых и термодинамических показателей для мониторинга процесса резания, а также позволят при назначении режимов точения определить возможные конфигурации срезаемого слоя и при необходимости произвести корректировку начальных параметров технологической системы.

Ключевые слова: продольное точение, срезаемый слой, комбинированный припуск, сварная заготовка, сварной шов, режимы резания

THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM' GEOMETRIC PARAMETERS ON THE COMBINED ALLOWANCE COMPOSITION WHEN TURNING TO A WORKPIECE WITH A REINFORCED WELD

Fominov E. V. ORCID ID 0000-0002-0165-7536

Federal State Budgetary Educational Institution "Donskoy State Technical University", Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: fominoff83@mail.ru

The article is devoted to determining the conditions for the occurrence of different compositions of the cut layer when turning the cylindrical surface of a workpiece containing a welded seam. The relevance of the research is due to the need to improve the efficiency of machining welded products under conditions of removing an allowance with variable geometric parameters and physical and mechanical properties. The aim of the study is to determine the conditions for changes in the composition of the combined allowance depending on the geometric parameters of the technological system when turning a workpiece with a reinforced welded seam. The technological system was studied during longitudinal external turning of a workpiece consisting of two parts connected by a welded seam with reinforcement. Three main possible variants of the cut layer composition were considered: two-component integral, two-component separate, and three-component integral. Mathematical modelling methods were used to determine the conditions for the occurrence of each variant depending on the combination of the system's geometric parameters. Analytical dependences were obtained that make it possible to determine the conditions for the occurrence of different types of cut layers. Based on the analysis of the parameter regions satisfying these conditions, it was established that the two-component integral allowance will prevail in most configurations of technological systems. Separation of the two-component allowance is possible at approach angle values of less than 45° and when machining long welded seams with a low reinforcement height. In addition, when turning extended welded sections at a small cutting depth using a tool with low approach angle values, three workpiece materials will be machined simultaneously, corresponding to the variant of a three-component integral allowance. The analytical dependences obtained in this work can be used as a preliminary geometric stage for the subsequent calculation of critical force and thermodynamic parameters for monitoring the cutting process. They also make it possible, when assigning turning modes, to determine possible configurations of the cut layer and, if necessary, adjust the initial parameters of the technological system.

Keywords: longitudinal turning, cut-off layer, combined allowance, welded work piece, weld seam, cutting modes

Введение

Процесс наружного продольного точения является одним из наиболее распространенных видов механической обработки на современных металлообрабатывающих предприятиях. Размеры и физико-механические свойства удаляемого при точении припуска во многом определяют термодинамическое состояние в зоне резания [1–3]. Площадь срезаемого слоя является главным геометрическим фактором, определяющим величину сил резания: с увеличением размеров сечения удаляемого материала силы резания возрастают [3, 4]. Повышение глубины резания и твердости обрабатываемого материала оказывает существенное влияние на вибрационные характеристики процесса резания, приводя к росту амплитуды и частоты вибраций вследствие формирования неустойчивых динамических режимов [5, 6]. В свою очередь, синергетическое воздействие всех перечисленных выше факторов определяет в итоге степень износа режущего инструмента [1, 3, 6]. Отдельно следует отметить, что состав и свойства припуска тесно связаны с формируемой в процессе точения шероховатостью обработанной поверхности [7–9]. Площадь срезаемого слоя и степень обрабатываемости материала опосредованно через силы резания определяют также энергетические и материальные затраты на изготовление деталей [10, 11]. Таким образом, идентификация состава срезаемого слоя является необходимым условием для определения оптимальных режимов резания по различным критериям оптимизации.

В общем случае входные параметры технологической системы, определяющие форму, размеры и физико-механические свойства припуска, в процессе обработки сохраняются постоянными. К ним относятся заданная глубина резания, подача, геометрия режущей части инструмента, а также материал заготовки. Для контроля состояния систем с постоянной конфигурацией служат современные системы мониторинга различных показателей процесса: температуры, сил резания, уровня вибраций [2, 4, 6]. Как правило, при превышении контролируемым параметром заданного критического уровня, что обычно обусловлено негативными эволюционными изменениями в системе, для предотвращения дальнейших поломок обработка останавливается.

Однако при точении изделий, состоящих из нескольких составных частей, исполненных при этом из различных материалов, задача поиска оптимальных режимов резания и допустимых критических значений показателей процесса резания значи-

тельно усложняется. Современные исследования в этой области уделяют большое внимание процессу мониторинга и повышению эффективности обработки гибридных изделий [12–14]. Примером удаления переменного по размерам и физико-механическим свойствам припуска может служить процесс точения заготовки, содержащей сварной шов с усилением. В таких случаях имеет место значительная временная дестабилизация силовых, термодинамических и вибрационных показателей процесса резания [15, 16]. При этом наибольшее проявление данных негативных факторов наблюдается на участках разделения материалов заготовки и сварного шва, а степень изменения контролируемых параметров процесса зависит от состава и размеров срезаемого слоя [16]. Таким образом, мониторинг процесса обработки и выбор оптимальных режимов резания при формообразовании многокомпонентных изделий представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Происходящий на этапе прохода сварного участка резкий рост температуры, сил и вибрационной активности инструмента может быть воспринят системой мониторинга, настроенной на чувствительность только к эволюционным изменениям в процессе обработки, как сигнал к отводу инструмента из зоны резания. Для предотвращения такой ситуации должен быть дополнительно задан уровень допустимого превышения контролируемых параметров, обусловленного конструктивными особенностями заготовки на определенных этапах обработки. В этой связи актуально определение априори допустимого уровня отклонений показателей технологической системы от нормальных условий ее функционирования, вызванных изменением состава и свойств срезаемого слоя, с целью предотвращения некорректного прерывания процесса точения.

Возможный уровень изменения сил резания и температуры может быть определен при помощи аналитических зависимостей, а также с применением методов цифрового имитационного моделирования, при условии, что известны переменные физико-механические свойства и геометрические параметры припуска [3, 6]. Для определения этих данных требуется вывод аналитических выражений, описывающих изменение глубины, ширины и площади срезаемого слоя для каждого материала многокомпонентного припуска в процессе прохода резцом сварного участка. Однако до этого на первом этапе необходимо определить принципиально возможные виды срезаемого

го слоя в зависимости от заданных геометрических параметров технологической системы; решению этой задачи и посвящена данная статья.

Цель исследования – определить условия изменения состава комбинированного срезаемого слоя в зависимости от геометрических параметров технологической системы при точении заготовки с усиленным сварным швом.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является процесс продольного наружного точения заготовки, состоящей из двух компонентов, соединенных сварным швом с усилением. Графическое представление процесса удаления припуска при перемещении резца за один оборот на величину подачи S в направлении D_s при пересечении начальной границы сварного участка представлено на рис. 1. В этом случае в зависимости от сочетания геометрических параметров резца и заготовки можно выделить следующие возможные варианты комбинированного припуска:

I) *Двухкомпонентный цельный* (общий случай) – состоит из двух разных материалов, имеющих общую поверхность, и снимается на одном непрерывном участке режущей кромки (рис. 1, а).

II) *Двухкомпонентный раздельный* (частный случай) – состоит из двух разных материалов, не имеющих общей поверхно-

сти, снимается на различных участках режущей кромки (рис. 1, б).

III) *Трехкомпонентный цельный* (частный случай) – состоит из трех разных материалов, имеющих общие поверхности, снимается на одном непрерывном участке режущей кромки (рис. 1, в).

Условия возникновения каждой из трех ситуаций определялись методом математического моделирования. В качестве исходных данных использованы геометрические параметры технологической системы, определяющие форму и состав комбинированного припуска: t – номинальная глубина резания; φ – главный угол в плане резца; L – длина сварного шва; H – высота усиления сварного шва; ω – угол разделки кромок на торцах свариваемых заготовок (рис. 2).

Предложенная модель (рис. 2) справедлива при соблюдении следующих ограничений:

1. Геометрические параметры сварного участка постоянны вдоль всей длины окружности заготовки, а внешний контур усиления шва имеет идеализированную форму в виде дуги.

2. Износ резца, искажающий его геометрию в основной плоскости, отсутствует либо пренебрежительно мал.

3. Радиус вершины резца отсутствует либо пренебрежительно мал.

4. Номинальная глубина резания постоянна, либо ее отклонениями, вызванными вибрационными возмущениями в системе в радиальном направлении, можно пренебречь.

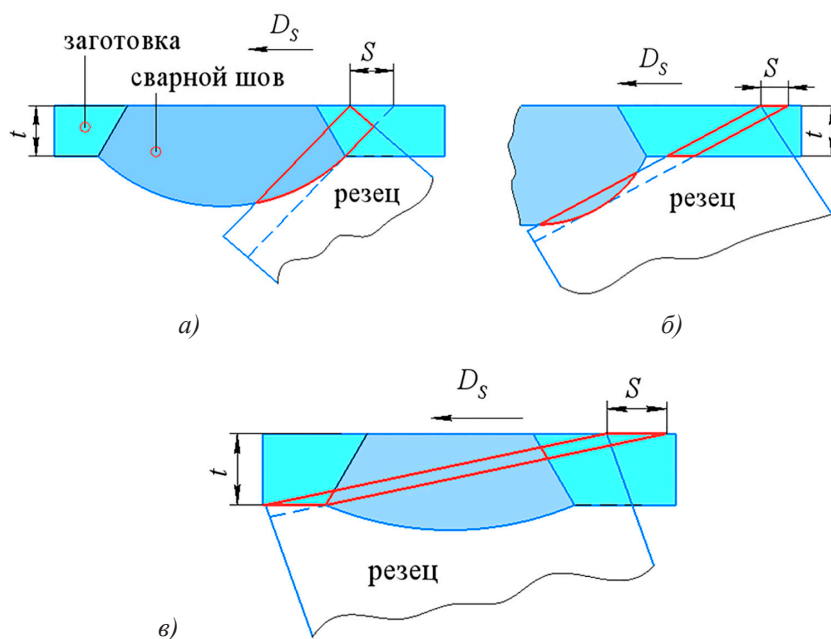


Рис. 1. Варианты комбинированного припуска: а) двухкомпонентный цельный; б) двухкомпонентный раздельный; в) трехкомпонентный цельный
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

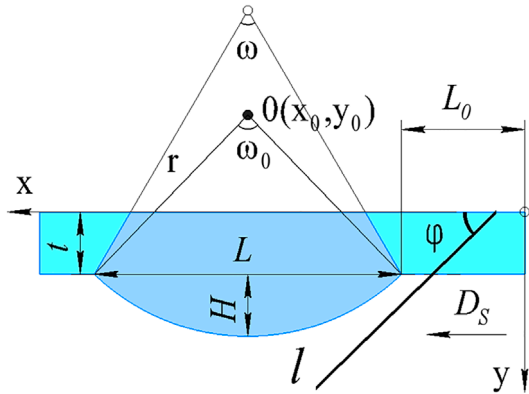


Рис. 2. Схема обработки сварного участка заготовки
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Результаты исследования и их обсуждение

Центр системы координат зададим на расстоянии L_0 от начальной точки сварного участка. Внешний контур усиления шва аппроксимируем дугой окружности со следующими характеристиками: r – радиус окружности; $O(x_0, y_0)$ – центр окружности; ω_0 – угол, стягивающий дугу. Значения этих параметров согласно расчетной схеме:

$$r = \frac{H}{2} + \frac{L^2}{8H}; \tag{1}$$

$$x_0 = L_0 + \frac{L}{2}, y_0 = (t + H) - r; \tag{2}$$

$$\omega = 2\arcsin\left(\frac{L}{2r}\right).$$

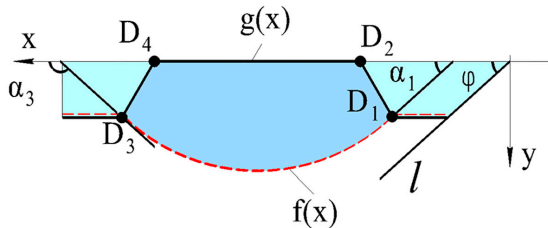


Рис. 3. Схема определения границ раздела материалов
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

На краях границ раздела материалов сварного шва и заготовки зададим точки со следующими координатами (рис. 3):

$$D_1(x, y) = (L_0, t);$$

$$D_2(x, y) = \left(L_0 + t \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right), 0\right),$$

$$D_3(x, y) = (L_0 + L, t);$$

$$D_4(x, y) = \left(L_0 + L - t \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right), 0\right).$$

Внешнюю границу сварного шва и границу материала заготовки представим в виде функций $f(x)$ и $g(x)$ соответственно:

$$f(x) = \begin{cases} t, & 0 < x < x_{D_1} \\ y_0 + \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2}, & x_{D_1} < x < x_{D_3} \\ t, & x > x_{D_3} \end{cases}$$

$$g(x) = \begin{cases} t, & 0 < x < x_{D_1} \\ -k_g \cdot x + b_{g1}, & x_{D_1} < x < x_{D_2} \\ 0, & x_{D_2} < x < x_{D_4} \\ k_g \cdot x + b_{g2}, & x_{D_4} < x < x_{D_3} \\ t, & x > x_{D_3} \end{cases},$$

где угловой коэффициент прямой

$$k_g = \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\omega}{2}\right),$$

а свободные члены уравнений наклонных линий

$$b_{g1} = k_g \cdot L_0 + t; b_{g2} = -k_g \cdot (L_0 + L) + t.$$

Главную режущую кромку резца представим в виде линии l , вершина которой находится в точке с координатой \tilde{x} , а ее уравнение запишем в виде

$$y = (x - \tilde{x}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi).$$

Тогда условия возникновения в технологической системе различных видов срезаемого слоя:

вариант I – для любых \tilde{x} возможно существование только одной точки пересечения прямой l и функции $f(x)$;

вариант II – для любых \tilde{x} возможно существование трех точек пересечения прямой l и функции $f(x)$;

вариант III – для любых \tilde{x} возможно существование трех точек пересечения прямой l и функции $g(x)$, две из которых принадлежат участкам D_1D_2 и D_3D_4 .

Для выяснения условий, при которых может иметь место ситуация I или ситуация II,

построим касательные к дуге окружности в точках D_1 и D_3 . Обозначим углы, которые эти касательные образуют с осью абсцисс α_1 и α_3 соответственно (рис. 3).

Ситуация с тремя точками пересечения возникает, если $\varphi < \alpha_1$ при $\varphi < 90^\circ$ и $\varphi > \alpha_3$ при $\varphi > 90^\circ$. Учитывая, что $\text{tg}(\alpha_3) = -\text{tg}(\alpha_1)$,

$$|\text{tg}(\varphi)| < \text{tg}(\alpha_1), \text{ при } \varphi \neq 90^\circ \tag{3}$$

Уравнение касательной в точке D_1 будет иметь вид

$$y = t - \frac{(L_0 - x_0)(x - L_0)}{(t - y_0)}$$

Откуда, с учетом (1, 2), получаем

$$\text{tg}(\alpha_1) = -\frac{(L_0 - x_0)}{(t - y_0)} = -\frac{\left(L_0 - \left(L_0 + \frac{L}{2}\right)\right)}{\left(t - (t + H - r)\right)} = \frac{4 \cdot \frac{L}{H}}{\left(\frac{L^2}{H^2} - 4\right)}$$

Тогда окончательно условие (3):

$$|\text{tg}(\varphi)| < \frac{4 \cdot \beta}{(\beta^2 - 4)}, \tag{У1}$$

где $\beta = L/H$.

Область параметров, удовлетворяющих (У1), представлена на рис. 4, а. Для наиболее распространенного значения угла в плане $\varphi = 45^\circ$ такая ситуация возникнет, если отношение ширины сварного шва L к высоте усиления H будет менее 5,0. Для значений $\varphi < 45^\circ$ ситуация имеет место начиная с более высоких значений L/H . Например, для $\varphi = 30^\circ$ формирование раздельного припуска возможно при $L/H < 7,48$. Область применимости установленного выше условия (У1) определяется неравенством $\beta = L/H > 2$.

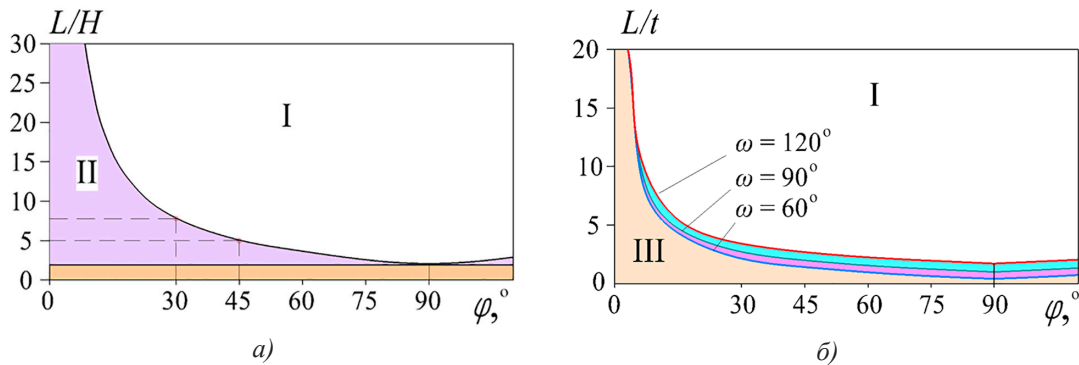


Рис. 4. Геометрические параметры системы, обеспечивающие формирование видов срезаемого слоя: а) – двухкомпонентного цельного (I) и двухкомпонентного раздельного (II); б) – двухкомпонентного цельного (I) и трехкомпонентного цельного (III)

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для формирования *трехэлементного цельного* припуска при $\varphi < 90^\circ$ длина участка линии l между $y = 0$ и $y = t$, равная $1 / \text{tg}(\varphi)$, должна быть больше, чем разница абсцисс точек D_2 и D_3 (или D_1 и D_4 , в силу симметрии это одинаковые расстояния):

$$\frac{t}{\text{tg}(\varphi)} > x_{D_3} - x_{D_2} = (L_0 + L) - \left(L_0 + t \cdot \text{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right)\right) = L - t \cdot \text{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right);$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) < \frac{1}{\frac{L}{t} - \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right)}.$$

То же условие при $\varphi > 90^\circ$ принимает вид

$$\frac{t}{\operatorname{tg}(180^\circ - \varphi)} > L - t \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right);$$

$$-\operatorname{tg}(\varphi) < \frac{1}{\frac{L}{t} - \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right)}.$$

Объединив эти два условия в одно выражение, получаем

$$|\operatorname{tg}(\varphi)| < \frac{1}{\frac{L}{t} - \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right)}. \quad (\text{У2})$$

Из рис. 4, б, видно, что возникновение условия (У2) более вероятно при малых величинах угла в плане. Для значений $\varphi = 45\text{--}95^\circ$ возникает при отношении L/t равном 3,5 и менее. При этом применение условия (У2) возможно, если справедливо неравенство $L/t - \operatorname{tg}(\omega/2) > 0$.

Заключение

В представленной статье посредством математического моделирования определены условия формирования различных видов срезаемого слоя при продольном наружном точении заготовки, содержащей сварное соединение с усилением. Рассмотрены три возможных случая, при которых, в зависимости от геометрических параметров рабочей части резца и сварного шва, удаляемый припуск будет цельным из двух материалов, из двух отдельных компонентов также из различных материалов, или же цельным, состоящим из трех различных материалов.

На основе анализа областей параметров, удовлетворяющих данным условиям, установлено, что ситуация с двухкомпонентным цельным припуском будет наиболее распространенной в большинстве конфигураций технологических систем. В этом случае в процессе резания на сварном участке глубина резания и твердость удаляемого материала будут постепенно возрастать.

При значениях угла в плане меньше 45° и значительных отличиях в длине шва и высоте его усиления припуск будет сниматься различными участками режущей кромки в виде двух независимых фрагментов. В этом случае удаление материалов с различной твердостью происходит на отдель-

ных участках с небольшой глубиной резания на каждом из них.

При точении протяженных сварных участков с маленькой глубиной резания (например, при чистовых проходах поверхностей крупногабаритных изделий) резцами с низкими значениями угла φ , становится возможной обработка режущей кромкой одновременно трех материалов с различными физико-механическими свойствами.

Таким образом, для расчета допустимых предельных силовых и термодинамических показателей в дальнейшем необходимо определить и использовать три варианта аналитических зависимостей, описывающих характеристики срезаемого слоя. Выбор конкретного выражения будет определяться установленными в данной работе условиями. Также полученные в статье результаты позволят при назначении режимов обработки и/или выборе конфигурации рабочей части инструмента определить возможные составы срезаемого слоя и оценить риски, связанные с каждым из них.

Список литературы

- Demirpolat H., Binali R., Patange A. D., Pardeshi S. S., Gnanasekaran S. Comparison of Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Forces, Tool Tip Temperature, and Chip Shape during Sustainable Turning of Bearing Steel // *Materials*. 2023. Vol. 16 (12). P. 4408. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/12/4408> (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/ma16124408.
- Chun H., Park W., Kim J., Lee C. In-Process Cutting Temperature Monitoring Method Based on Impedance Model of Dielectric Coating Layer at Tool-Chip Interface // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022. Vol. 6 (5). P. 97. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/6/5/97> (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/jmmp6050097.
- Gvindjiliya V. E., Fominov E. V., Marchenko A. A., Lavrenova T. V., Debeeva S. A. Influence of cutting speed on pulse changes in the temperature of the front cutter surface during turning of heat-resistant steel 0.17 C-Cr-Ni-0.6 Mo-V // *Metal Working and Material Science*. 2025. Vol. 27 (3). P. 23–36. URL: <https://journals.nstu.ru/files/numbers/flash/4661/23/> (дата обращения: 01.05.2026). DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-23-36.
- Jamshidi M., Rimpault X., Balazinski M., Chatelain J.-F. Fractal analysis implementation for tool wear monitoring based on cutting force signals during CFRP/titanium stack machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. P. 3859–3868. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04880-y> (дата обращения: 01.05.2026). DOI: 10.1007/s00170-019-04880-y.
- Hassan M., Kirwin R., Rakurty C. S., Mahajan A. Advanced Sensor Technologies in Cutting Applications: A Review // *Sensors*. 2026. Vol. 26 (3). P. 762. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/26/3/762> (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/s26030762.
- Gvindjiliya V. E. Vibration Control of Tool Flank Wear in Turning // *Advanced Engineering Research*. 2026. Vol. 26 (1). P. 2103. URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/2617> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.23947/2687-1653-2026-26-1-2103.
- Machno M., Zębala W., Franczyk E. Impact of Cutting Parameters and Tool Type on Surface Finish in MQL Turning of Inconel 625 // *Materials*. 2025. Vol. 18 (1). P. 4617. URL:

<https://www.mdpi.com/1996-1944/18/19/4617> (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/ma18194617.

8. Medina S., Acuña-Rivera M., Castellanos S., Castro K. Evaluation of Machining Parameters in Turning Al7075-T6 Aluminum Alloy Using Dry, Flooded, and Cryogenic Cutting Fluid Conditions // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2025. Vol. 9 (10). P. 328. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/10/328> (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/jmmp9100328.

9. Vu T.-H., Hsu C.-H. Experimental Investigation and Predictive Modeling of Surface Roughness in Dry Turning of AISI 1045 Steel Using Power-Law and Response Surface Approaches // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16 (3). P. 1392. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/16/3/1392> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3390/app16031392.

10. Marinkovic D., Muhamedagic K., Klančnik S., Zivkovic A., Begic-Hajdarevic D., Pasic M. Integrated Modeling and Multi-Criteria Analysis of the Turning Process of 42CrMo4 Steel Using RSM, SVR with OFAT, and MCDM Techniques // *Metals*. 2026. Vol. 16 (2). P. 131. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/16/2/131> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3390/met16020131.

11. Madić M., Trifunović M., Rodić D., Marinković D. Development of Machine Learning Model for Analysis of Total Manufacturing Cost in Medium Turning of C45E Steel // *Metals*. 2026. Vol. 16 (4). P. 373. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/16/4/373> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3390/met16040373.

12. Denkena B., Behrens B. A., Overmeyer L., Kaielerle S., Bergmann B., Klemme H., Hermsdorf J., Stonis M., Schwarz N., Budde L., Merkel P., Handrup M. Sensitivity of process signals to deviations in material distribution and material properties of hybrid workpieces // *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology. 2024. Vol. 130. P. 2649–2659. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12807-x> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.1007/s00170-023-12807-x.

13. Denkena B., Behrens B. A., Bergmann B., Stonis M., Kruse J., Witt M. Potential of process information transfer along the process chain of hybrid components for process monitoring of the cutting process // *Production Engineering Research and Development*. 2021. Vol. 15 (2). P. 199–209. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-021-01023-9> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.1007/s11740-021-01023-9.

14. Denkena B., Bergmann B., Buhl H., Handrup M. Similarity-based anomaly detection method for turning of multi-material workpieces with varying axially constant blank diameter // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2025. Vol. 63. P. 201–213. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581725001658?via%3Dihub> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.09.014.

15. Бычковский В. С., Филиппенко Н. Г., Попов С. И., Каргапольцев С. К. Исследование свойств и обрабатываемости сварных соединений комбинированным ротационным резцом со стружколомом // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 1 (57). С. 16–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystvi-obrabatyvaemosti-svarnyh-soedineniy-kombinirovannym-rotatsionnym-reztsom-so-struzhkolomom> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23.

16. Fominov E. V., Aliev M. M., Shuchev K. G., Lavrenova T. V. Tribostrain and Thermoelectric Characteristics of the Friction Process during Turning of a Hybrid Part with a Welded Seam // *Journal of Friction and Wear*. 2025. Vol. 46. P. 86–91. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068366625700400> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3103/S1068366625700400.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Финансирование осуществлялось в рамках соглашения от 29 октября 2025 г. № 075-03-2025-302/8 на реализацию ПНИ «Разработка программно-аппаратных средств для мониторинга и анализа параметров резания и эксплуатационных характеристик станков с ЧПУ» (FZNE-2025-0008).

Financing: The work was carried out within the framework of the agreement dated 10/29/2025 No. 075-03-2025-302/8 for the implementation of the research project “Development of software and hardware for monitoring and analyzing cutting parameters and performance characteristics of CNC machines” (FZNE-2025-0008).