

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.941.01

doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-27-33

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СПЛАВА ТН1

Павел Валерьевич Целиков<sup>1✉</sup>, Дмитрий Сергеевич Губин<sup>2</sup>, Антон Геннадьевич Кисель<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет, Омск, Россия

<sup>1</sup> patersort@list.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>

<sup>2</sup> gubin.89@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1825-1310>

<sup>3</sup> anton.kisel@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>

### Аннотация

Цель исследования: определение рациональных режимов точения сплава ТН1 по наименьшему коэффициенту трения в зоне резания. Задачи, решению которых посвящена статья: составить план эксперимента по точению заготовки при различных режимах резания; измерить толщину стружки с помощью графического редактора Компас-3D для каждого режима резания; рассчитать величины коэффициента усадки стружки при каждом из режимов резания; определить расчетным путем величины коэффициента трения между стружкой и режущим инструментом; установить зависимость коэффициента трения от режимов резания; определить режим токарной обработки, при котором коэффициент трения принимает наименьшее значение. Для достижения поставленной цели были проведены

экспериментальные исследования для определения величин усадки стружки при различных режимах резания. По установленным значениям коэффициента усадки расчетным путем были определены коэффициенты трения в зоне резания между стружкой и передней поверхностью резца. В результате проведенных исследований были установлены эмпирические зависимости, позволяющие расчетным путем определить величину коэффициента трения между передней поверхностью резца и стружкой при точении сплава ТН1 с погрешностью менее 1,4%. Экспериментально определены рациональные режимы, соответствующие наименьшему коэффициенту трения в зоне резания.

**Ключевые слова:** сплав ТН1, токарная обработка, заготовка, резец, коэффициент трения.

Ссылка для цитирования:

Целиков П.В. Влияние режимов на коэффициент трения в зоне резания при точении сплава ТН1/ П.В. Целиков, Д.С. Губин, А.Г. Кисель // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 8. – С. 27-33. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-27-33.

Original article

Open Access Article

## EFFECT OF MODES ON FRICTION COEFFICIENT IN THE CUTTING AREA WHEN TURNING TN1 ALLOY

Pavel Valerievich Tselikov<sup>1✉</sup>, Dmitry Sergeevich Gubin<sup>2</sup>, Anton Gennadievich Kisel<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

<sup>2</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>1</sup> patersort@list.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>

<sup>2</sup> gubin.89@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1825-1310>

<sup>3</sup> anton.kisel@klgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>

### Abstract

The study objective is to determine the rational turning modes of TN1 alloy according to the lowest friction coefficient in the cutting area. The tasks to which the paper is devoted are: to draw up an experi-

ment plan for turning the workpiece under various cutting modes; to measure the chip thickness using Compass-3D graphic editor for each cutting mode; to calculate the values of the chip shrink factor for each of the

cutting modes; to calculate the values of friction coefficient between the chip and the cutting tool; to find the dependence of friction coefficient from cutting modes; to determine the turning mode in which friction coefficient has the lowest value. To achieve this goal, experimental studies are conducted to determine the values of chip shrinkage under various cutting modes. According to the found values of the shrink factor, the friction coefficients in the cutting area between the chips and the front surface of the cutter are calculated.

*Reference for citing:*

*Tselikov PV, Gubin DS, Kisel AG. Effect of modes on friction coefficient in the cutting area when turning TN1 alloy. Transport Engineering. 2025;8:27-33. doi: 10.30987/2782-5957-2025-8-27-33.*

## Введение

Процессы обработки металлических заготовок резанием сопровождаются такими явлениями в зоне обработки, как:

- внутреннее трение, возникающее при деформации обрабатываемого материала;
- трение между поверхностями инструмента, стружки и обработанной (обрабатываемой) части заготовки;
- как следствие – выделение и распределение теплоты, возникновение сил резания, деформирующих заготовку и инструмент, появление и развитие износа режущего инструмента.

Названные явления негативно влияют на качество получаемой поверхности, точность размеров детали, стойкость инструмента и на себестоимость обработки в целом. Поэтому действия, направленные на устранение или снижение влияния негативных факторов, возникающих при резании, являются актуальными.

Повышения эффективности обработки (снижения степени воздействия негативных факторов) можно достигнуть различными способами:

- назначение рациональных режимов резания [1, 2, 3];
- выбор рациональной стратегии обработки [4, 5, 6];
- применение эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) [7, 8, 9];

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследования проводились на токарном станке с ЧПУ модели УТС6 (рис. 1). Смазочно-охлаждающие жидкости при ис-

As a result of the research, empirical dependences are found that make it possible to calculate the value of the friction coefficient between the front surface of the cutter and the chips when turning TN1 alloy with an error of less than 1.4%. The rational modes corresponding to the lowest friction coefficient in the cutting area are experimentally determined.

**Keywords:** TN1 alloy, turning, workpiece, cutter, friction coefficient.

– применение режущих инструментов из стойких к изнашиванию материалов, с оптимальной геометрией и износостойкими покрытиями [10, 11, 12];

– воздействие на инструмент или заготовку физических или химических процессов, позволяющих снизить силу трения и силу резания, уменьшить выделение тепла, повысить износостойкость инструмента и т.п. [13, 14, 15].

Целью данной работы является определение рациональных режимов точения сплава ТН1 по наименьшему коэффициенту трения в зоне резания. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Составить план эксперимента по точению заготовки при различных режимах резания;
2. Измерить толщину стружки с помощью графического редактора Компас-3D для каждого режима резания;
3. Рассчитать величины коэффициента усадки стружки при каждом из режимов резания;
4. Определить расчетным путем величины коэффициента трения между стружкой и режущим инструментом;
5. Установить зависимость коэффициента трения от режимов резания;
6. Определить режим токарной обработки, при котором коэффициент трения принимает наименьшее значение.

пытаниях не применялись для обеспечения меньшего количества влияющих факторов.

В качестве режущего инструмента применялся токарный резец со сменной твердосплавной режущей пластиной *CCMT09T308-EM* производства компании *ZCC-CT* с покрытием *PVD*. Данная режущая пластина может применяться для чистовых и получистовых режимов обработки заготовок из жаропрочных и коррозионностойких сплавов. Геометрические параметры режущего инструмента: главный передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , главный задний угол  $\alpha = 7^\circ$ , главный угол в плане  $\phi = 90^\circ$ , угол при вершине в плане  $\epsilon = 80^\circ$ .

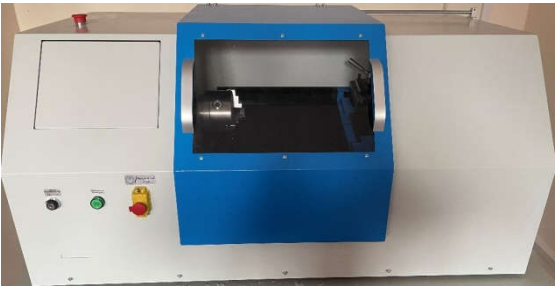


Рис. 1. Станок с ЧПУ модели UTC6  
Fig. 1. CNC machine model UTS6

Заготовка была изготовлена из сплава ТН1 и имела диаметр 10 мм. Применявшиеся при исследованиях режимы обработки, соответствующие используемым на машиностроительных

предприятиях при точении исследуемого материала, представлены в табл. 1. В процессе испытаний производился сбор получаемой стружки для каждого из применяемых режимов резания. В качестве измеряемого параметра для оценки коэффициента усадки была принята толщина стружки. Это обосновано тем, что по величине усадки можно рассчитать средний коэффициент трения между стружкой и передней поверхностью режущей пластины [16]. Для расчета коэффициента трения применялась схема стружкообразования, представленная в данной публикации, показана на рис. 2.

Таблица 1  
Table 1

План эксперимента  
Experimental plan

№ опыта	$V$ , м/мин	$S$ , мм/об	$t$ , мм
1	5	0,03	0,1
2	30	0,03	0,1
3	5	0,2	0,1
4	30	0,2	0,1
5	5	0,03	0,3
6	30	0,03	0,3
7	5	0,2	0,3
8	30	0,2	0,3

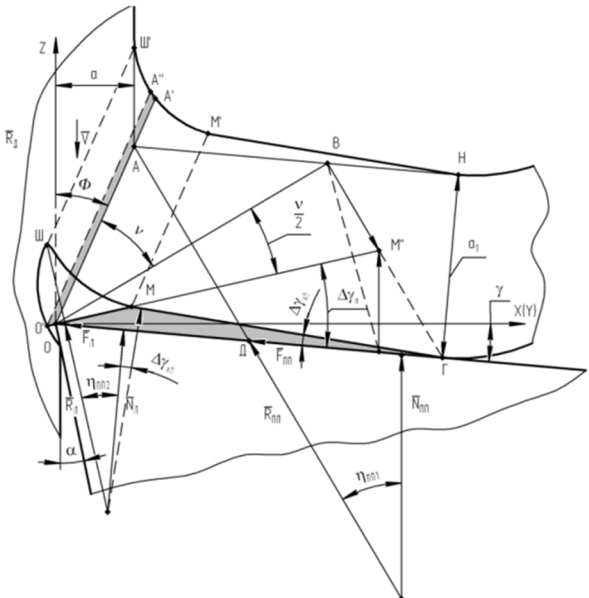


Рис. 2. Коррекционная схема безламельного стружкообразования [16]  
Fig. 2. Correction scheme of lamelless chip formation [16]

Расчетная формула для определения коэффициента трения имеет вид [16]:

$$\mu = \operatorname{tg} \left( 22,5 + \Delta\gamma_{\text{хв}} - \frac{\Phi - \gamma}{4} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta\gamma_{\text{хв}}$  – дополнительный положитель-

ный передний угол, °;  $\Phi$  – угол сдвига, °;  $\gamma$  – главный передний угол, °. Поскольку при точении титано-никелевых сплавов нарост на передней поверхности не образуется, а застойная зона мала, принято допущение, что угол  $\Delta\gamma_{\text{хв}}$  равен 0.

Определение угла сдвига  $\Phi$  производилось на основе формулы Тиме для расчета коэффициента усадки стружки  $K_y$  по толщине срезаемого слоя  $a$ , мм, и толщине стружки  $a_c$ , мм:

$$K_y = \frac{a_c}{a} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin\Phi}. \quad (2)$$

Поскольку главный угол в плане  $\varphi=90^\circ$ , как было сказано ранее, толщина срезаемого слоя  $a$ , мм, равняется величине подачи  $S$ , мм/об.

После преобразований была получена следующая формула для расчета угла сдвига:

## Результаты

В результате проведенных экспериментальных исследований после выполнения расчетов по выражениям (3) и (1) были получены величины коэффициентов усадки стружки и коэффициентов трения между стружкой и передней поверхностью режущей пластины для каждого из применявшихся режимов.

Установленные величины представлены в табл. 2.

## Обсуждение/Заключение

Для оценки взаимосвязи коэффициента трения в зоне обработки и применяемых режимов резания при точении заготовки из сплава ТН1 в работе по экспериментальным данным были рассчитаны коэффициенты и выведены зависимости вида:

$$\mu = CV^X S^Y, \quad (4)$$

где  $C$ ,  $X$ ,  $Y$  – постоянные коэффициенты.

Поскольку предварительный расчет дал большую погрешность при выведении

$$\Phi = \arccos \frac{\left( \frac{a_c}{a} - \sin\gamma \right)}{\cos\gamma}. \quad (3)$$

Параметры стружки измерялись с помощью цифрового микроскопа с последующей обработкой изображений в системе КОМПАС-3D после масштабирования до реальных размеров измеряемого объекта с помощью тарировочной шкалы. Один из примеров полученных изображений стружки представлен на рис. 3.

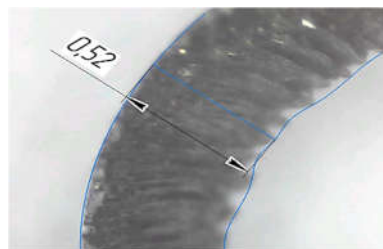


Рис. 3. Пример измерения толщины стружки из сплава ТН1

*Fig. 3. An example of measuring the thickness of TN1 alloy chips*

Таблица 2  
Результаты расчетов коэффициента усадки и коэффициента трения

*Table 2*  
*The results of calculations of the coefficient of shrinkage and coefficient of friction*

№ опыта	$K_y$	$\mu$
1	8,667	0,521
2	3,05	0,458
3	0,835	0,299
4	0,643	0,265
5	15,7	0,537
6	3,683	0,474
7	1,998	0,414
8	1,183	0,346

зависимости для всего плана экспериментов, было решено строить зависимости для разных глубин резания по отдельности. Причиной невозможности получения зависимости для всего плана может служить отличие происходящих процессов при разных глубинах резания в связи со склонностью обрабатываемого материала к наклепу в поверхностном слое [17]. Установленные значения констант для формулы (4) представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Рассчитанные коэффициенты  
эмпирических зависимостей

Table 3

*Calculated coefficients  
of empirical dependencies*

Константы	Значения при $t$	
	0,1 мм	0,3 мм
$C$	0,20925	0,36752
$X$	-0,06909	-0,08504
$Y$	-0,29113	-0,15113

С целью определения погрешности расчета по полученным зависимостям в формулу (4) были подставлены соответствующие коэффициенты и рассчитаны величины коэффициентов трения для каждого из применявшихся режимов, после чего были определены относительные погрешности расчета.

Оценка результатов, представленных в табл. 4 показывает, что погрешность расчета по выведенным зависимостям составляет менее 1,4 %, что является достаточно большой точностью.

Таким образом, формулы для расчета коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью резца с применявшимися геометрическими параметрами при точении заготовок из сплава ТН1 будут иметь вид:

– для глубины резания  $t = 0,1$  мм:  
 $\mu = 0,20925V^{-0,06909}S^{-0,29113}$ ; (5)

– для глубины резания  $t = 0,3$  мм:  
 $\mu = 0,36752V^{-0,08504}S^{-0,15113}$ . (6).

Таблица 4  
Результаты расчетов по эмпирическим  
зависимостям

Table 4

*The results of calculations based  
on empirical dependencies*

№ опыта	$\mu$	$\mu_{\text{расч}}$	$\delta, \%$
1	0,521	0,520	-0,212
2	0,458	0,459	0,213
3	0,299	0,299	0,213
4	0,265	0,264	-0,212
5	0,537	0,545	1,364
6	0,474	0,468	-1,345
7	0,414	0,409	-1,345
8	0,346	0,351	1,364

Также по полученным результатам можно сделать вывод о наиболее рациональных режимах резания по коэффициенту трения для описанных условий точения при:

– глубине резания  $t = 0,1$  мм рациональным режимом является:  $V = 30$  м/мин,  $S = 0,2$  мм/об;

– глубине резания  $t = 0,3$  мм рациональным режимом является:  $V = 30$  м/мин,  $S = 0,2$  мм/об.

Таким образом, при выбранных глубинах резания в обоих случаях следует назначать скорость резания  $V=30$  м/мин и подачу  $S=0,2$  мм/об, что обеспечит наименьший коэффициент трения в зоне резания: при  $t = 0,1$  мм  $\mu = 0,265$ ; при  $t = 0,3$  мм  $\mu = 0,351$ .

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. К вопросу о назначении рациональных режимов резания на токарных и расточных операциях / А. А. Жданов, А. А. Кожевникова, Р. Н. Саловаров, Д. С. Субботин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2025. № 1(296). С. 14-17. – DOI 10.35211/1990-5297-2025-1-296-14-17.
2. Анализ используемых методик для назначения режимных условий процесса резания / В. Ф. Безъязычный, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко, Э. В. Киселев // Технология металлов. 2017. № 12. С. 2-10.
3. Влияние режимов механической обработки стали 38ХНЗМФА на величину остаточных напряжений / О. Ю. Александрова, А. А. Ширяев, А. В. Снегирева [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20, № 1. С. 27-33. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.03.
4. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling / S. A. Lyubomudrov, I. N. Khrustaleva, A. A. Tolstoles, A. P. Maslakov // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 669-677. – DOI 10.31897/PMI.2019.6.669.
5. Simulation Modeling Features of Various Machine-Building Enterprise Types / V. Dolgov, P. Nikishechkin, S. Ivashin, N. Dolgov // MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 346. P. 03079. – DOI 10.1051/mateconf/202134603079.
6. Наумкин, И. А. Анализ существующих моделей технологической подготовки производства на машиностроительных предприятиях / И. А.

- Наумкин // Научный аспект. 2024. Т. 51, № 6. С. 6470-6474.
7. Абишев, К. К. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на качество обработки в машиностроении / К. К. Абишев, Р. Б. Муканов, А. В. Маздубай // EurasiaScience : Сборник статей LXIV международной научно-практической конференции, Москва, 30 сентября 2024 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность РФ», 2024. С. 55-58.
  8. Возможности прогнозирования показателей шероховатости поверхности при токарной обработке стальных заготовок твердосплавными резцами с применением СОТС / А. А. Жданов, Ж. С. Тихонова, Д. П. Линьков, А. Г. Минаева // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 3(274). С. 14-18. – DOI 10.35211/1990-5297-2023-3-274-14-18.
  9. Гайфуллин, И. И. Влияние физико-химических параметров смазочно-охлаждающих технологических сред на силовые показатели процесса лезвийной обработки / И. И. Гайфуллин, А. М. Пласин, В. Ю. Пиунов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 385-395. – DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-2-385-395.
  10. Соколов, А. Г. Влияние диффузионного титанирования из среды легкоплавких жидкометаллических растворов на работоспособность режущего твердосплавного инструмента типа ТК и ВК / А. Г. Соколов, Э. Э. Бобылев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20, № 4. С. 46-59. – DOI 10.17212/1994-6309-2018-20.4-46-59.
  11. Особенности процессов высокоскоростного фрезерования сложного профиля инструментом при обработке алюминиевых сплавов и композиционных материалов / М. С. Вакулин, Ю. И. Гордеев, В. Б. Ясинский [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 570-588. – DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-3-570-588.
  12. Бобылев, Э. Э. Повышение эксплуатационных свойств режущего твердосплавного инструмента за счет диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических расплавов : специальность 05.16.06 "Порошковая металлургия и композиционные материалы" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бобылев Эдуард Эдуардович. Новочеркасск, 2020. 22 с.
  13. Левченко, Е. А. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей при виброабразивной обработке с применением ультразвука / Е. А. Левченко, Л. Л. Новиков // Вестник современных технологий. 2024. № 1(33). С. 14-20.
  14. Шаповалова, Г. Я. Исследование влияния предварительного нагрева заготовки на качество поверхностного слоя деталей / Г. Я. Шаповалова // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2019. № 4(29). С. 27-35.
  15. Иноземцев, В. Е. Исследование применения совмещённых методов обработки медных и алюминиевых сплавов / В. Е. Иноземцев // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 11(96). С. 26-35. – DOI 10.30987/1999-8775-2020-11-26-35.
  16. Баннов, К. В. Коэффициент трения в процессе направленного разрушения металлов резанием / К. В. Баннов, В. С. Матвеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1-2. С. 388-391.
  17. Целиков, П. В. Исследование изнашивания режущего инструмента при точении сплава ТН1 / П. В. Целиков, А. Г. Кисель // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 2(66). С. 43-49. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-43-49.

## REFERENCES

1. Zhdanov AA, Kozhevnikova AA, Salovarov RN, Subbotin DS. On the issue of assigning rational cutting modes for turning and boring operations. Izvestia VSTU. 2025;1(296):14-17. DOI 10.35211/1990-5297-2025-1-296-14-17.
2. Bezyazychny VF, Timofeev MV, Fomenko RN, Kiselev EV. Analysis of the methods used to determine the pressure conditions of cutting. Tekhnologiya Metallov. 2017;12:2-10.
3. Aleksandrova OYu, Shiryaev AA, Snegireva AV, Trofimov VN, Rarmanov VV. Influence of the modes of mechanical processing of steel 38KH3MFA on the value of residual macrostresses. Bulletin of PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science. 2018;20(1):27-33. DOI 10.15593/2224-9877/2018.1.03.
4. Lyubomudrov SA, Khrustaleva IN, Tolstoles AA, Maslakov AP. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling. Journal of Mining Institute. 2019;240:669-677. DOI 10.31897/PMI.2019.6.669.
5. Dolgov V, Nikishechkin P, Ivashin S, Dolgov N. Simulation modeling features of various machine-building enterprise types. MATEC Web of Conferences. 2021;346:03079. DOI 10.1051/mateconf/202134603079.
6. Naumkin, IA. Analysis of existing models of technological preparation of production at machine-building enterprises. Nauchnyy Aspekt. 2024;51(6):6470-6474.
7. Abishev KK, Mukanov RB, Mazdubai AV. Influence of lubricating and cooling fluids on the quality of treatment in mechanical engineering. EurasiaScience: Collection of Papers of the LXIV International Scientific and Practical conference, September 30, 2024. Moscow: Aktualnost RF; 2024.
8. Zhdanov AA, Tikhonova ZhS, Linkov DP, Minaeva AG. Possibilities of prediction of surface roughness indicators when turning steel blanks with car-

- bide cutter. *Izvestia VSTU*. 2023;3(274):14-18. DOI 10.35211/1990-5297-2023-3-274-14-18.
9. Gaifullin II, Plaksin AM, Piunov VYu. Influence of physical and chemical properties of cutting fluids on the cutting force of the cutting process. *The Siberian Aerospace Journal*. 2023;24(2):385-395. DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-2-385-395.
  10. Sokolov AG, Bobylev EE. Influence of the diffusion titanizing from low-melting liquid metal medium on the performance of Ti-WC-Co and WC-Co cutting carbide-tipped tool. *Obrabotka Metallov/Metal Working and Material Science*. 2018;20(4):46-59. DOI 10.17212/1994-6309-2018-20.4-46-59.
  11. 11. Vakulin MS, Gordeev YuI, Yasinsky VB, Binchurov AS, Timoshev PV. Features of processes of high-speed milling with a complex profile tool in the processing of aluminum alloys and composite materials. *The Siberian Aerospace Journal*. 2023;24(3):570-588. DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-3-570-588.
  12. 12. Bobylev EE. Improving the operational properties of cutting carbide tools due to diffusion metalization from the medium of easily fusible liquid metal melts [abstract of dissertation]. [Novocherkassk (RF)]; 2020.
  13. 13. Levchenko EA, Novikov LL. Technological assurance of the surface layer quality and the operational properties of parts during vibration-abrasive treatment using ultrasound. *Journal of Modern Technologies*. 2024;1(33):14-20.
  14. 14. Shapovalova GYa. Investigation of the effect of preeating the workpiece on the quality of the surface layer of parts. *Resource-saving technologies of production and forming materials in mechanical engineering*. 2019;4(29):27-35.
  15. 15. Inozemtsev VE. Investigation of combined method use for copper and aluminum alloy processing. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2020;11(96):26-35. DOI 10.30987/1999-8775-2020-11-26-35.
  16. 16. Matveev VS, Bannov KV. Friction coefficient in the course of metals directional destruction by cutting. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1-2):388-391.
  17. 17. Tselikov PV, Kisel AG. Investigation of the dependence of the wear intensity of the cutting tool during turning of TN1 alloy. *Systems. Methods. Technologies*. 2025;2(66):43-49. DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-43-49.

#### Информация об авторах:

**Целиков Павел Валерьевич** – аспирант кафедры «Инжиниринга технологического оборудования» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет».

**Губин Дмитрий Сергеевич** – инженер кафедры «Материаловедение и технологии материалов»

**Tselikov Pavel Valerievich** – Postgraduate student of the Department of Engineering of Technological Equipment, Kaliningrad State Technical University.

**Gubin Dmitry Sergeevich** – Engineer of the Department of Materials Science and Technology of Materials, Omsk State Technical University.

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет».

**Кисель Антон Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инжиниринга технологического оборудования» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», тел. +7-999-458-08-25.

**Kisel Anton Gennadievich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering of Technological Equipment, Kaliningrad State Technical University, phone: +7-999-458-08-25.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 09.07.2025; принята к публикации 28.07.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.**

**The article was submitted to the editorial office on 08.07.2025; approved after review on 09.07.2025; accepted for publication on 28.07.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.**