

# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.941.01

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 12X18H10T

Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Современные газотурбинные двигатели обуславливают высокие требования к материалам, используемым в их конструкциях. Детали таких двигателей, как лопатки турбин, диски, камеры сгорания и сопловые аппараты, работают в экстремальных условиях: при высоких температурах, значительных механических нагрузках и агрессивных средах. **Целью работы** является исследование свойств инструментальных твердых сплавов марок BK8, T5K10 и T14K8 и их влияния на характеристики процесса резания криогенной конструкционной стали 12X18H10T. **Используемые методы.** При решении вышеуказанных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования резания металлов, режущего инструмента и законов физики раздела электродинамики. **Новизна.** Установлена взаимосвязь физико-механических характеристик материалов с механическими характеристиками процесса резания. **Результат.** Проведенные исследования показали, что интенсивность изнашивания инструмента, величина шероховатости и наклеп обработанной поверхности находятся в корреляционной взаимосвязи. **Практическая значимость.** Результаты исследований в этой области имеют ключевое значение для авиационного и энергетического машиностроения, где снижение себестоимости изготовления деталей при сохранении их надежности остается одной из важнейших задач.

**Ключевые слова:** резание материалов, токарная обработка, физико-технические характеристики материалов, твердые сплавы, механические характеристики процесса резания

© Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С., 2025

### Для цитирования

Исследование взаимосвязи свойств инструментальных материалов с процессом резания на примере токарной обработки стали 12X18H10T / Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 80-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# RESEARCH ON THE RELATIONSHIP BETWEEN TOOL MATERIAL PROPERTIES AND THE CUTTING PROCESS: A CASE STUDY OF TURNING 12H18N10T STEEL

Artamonov E.V., Shtin A.S., Tveryakov A.M., Vasilega D.S.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Modern gas turbine engines impose high requirements to the materials used in their constructions. Parts of such engines as turbine blades, discs, combustion chambers and nozzle assembly work in extreme conditions: at high temperatures, significant mechanical loads and aggressive media. **Objectives.** The aim of the work is to study the properties of tool hard alloys of WC8 (92%WC+8%Co), TiC5C10 (85%WC+5%TiC+10%Co) and TiC14C8 (78%WC+14%TiC+8%Co) grades and their influence on the cutting process characteristics of cryogenic structural 12H18N10T (0,12%C+18%Cr+10%Ni+10%Ti+61,88%Fe) steel. **Methods Applied.** When solving the above mentioned problems, theoretical and experimental methods of study of metal cutting, cutting tools and laws of physics of electrodynamics field were used. **Originality.** The interrelation of physical and mechanical characteristics of materials with mechanical characteristics of cutting process is established. **Result.** The conducted research has shown that the intensity of tool wear, roughness value and coldworking of the processed surface are correlated. **Practical significance.** The results of research in this area are of key importance for aviation and power engineering, where the reduction of production cost of parts while maintaining their reliability remains one of the most important tasks.

**Keywords:** cutting of materials, turning process, physical and technical characteristics of materials, hard alloys, mechanical characteristics of the cutting process

## For citation

Artamonov E.V., Shtin A.S., Tveryakov A.M., Vasilega D.S. Research on the Relationship Between Tool Material Properties and the Cutting Process: a Case Study of Turning 12H18N10T Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 80-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86>

## Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) обуславливают высокие требования к материалам, используемым в их конструкциях. Детали таких двигателей, как лопатки турбин, диски, камеры сгорания и сопловые аппараты, работают в экстремальных условиях: при высоких температурах, значительных механических нагрузках и агрессивных средах. Для обеспечения надежности и долговечности этих компонентов применяются труднообрабатываемые материалы, такие как жаропрочные никелевые и кобальтовые сплавы, титановые композиты и керамические покрытия.

Однако уникальные эксплуатационные свойства этих материалов создают серьезные технологические сложности при их механической обработке. Высокая твердость, низкая теплопроводность, склонность к наклепу и абразивному износу инструмента требуют применения специализированных методов резания, нетрадиционных способов обработки и оптимизации режимов. В данной статье рассматриваются основные проблемы, возникающие при обработке труднообрабатываемых материалов для ГТД, а также перспективные технологические решения, направленные на повышение эффективности производства и качества деталей.

На сегодняшний день работоспособность режущего инструмента изучена с различных позиций, в том числе прочности и стойкости. Однако влияние физико-

механических свойств инструментального материала на работоспособность изучено недостаточно полно. Значительный вклад в развитие науки о резании металлов и режущем инструменте внесли ученые: Бобров В.Д. [1], Васин С.А. [2], Верещака А.С. [3], Грановский Г.И. [4], Григорьев С.Н. [5], Древаль А.Е. [6], Зорев Н.Н. [7], Кабалдин Ю.Г. [8], Креймер, Г.С. [9], Лоладзе Т.Н. [10], Макаров А.Д. [11], Полетика М.Ф. [12], Силин С.С. [13], M. Carceanu, I. [14], Ferri, C. [15], Kümmel, J. [16], Munish Kumar Gupta [17], Murthy, K.S. [18], Neugebauer R. [19], Nurulamin A. [20], Patwari A. [21], Tillmann W. [22].

Результаты исследований в этой области имеют ключевое значение для авиационного и энергетического машиностроения, где снижение себестоимости изготовления деталей при сохранении их надежности остается одной из важнейших задач.

Целью работы является исследование свойств инструментальных твердых сплавов марок BK8, T5K10 и T14K8 и их влияния на характеристики процесса резания криогенной конструкционной стали 12X18H10T.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести литературный обзор по исследуемой тематике.
2. Определить характеристики процесса резания, реагирующие на изменение свойств инструментальных материалов.

3. Провести исследование взаимосвязи свойств инструментальных материалов и характеристик процесса резания на примере токарной обработки стали 12Х18Н10Т.

Известно, что резцы, оснащенные различными марками твердых сплавов, имеют различные оптимальные скорости резания, при которых интенсивность их износа минимальна. Следовательно, путем выбора соответствующего инструментального материала можно в известных пределах регулировать интенсивность изнашивания инструмента и точность обработки.

В связи с этим представляет научный и практический интерес выяснение возможности регулирования качества поверхностного слоя деталей за счет выбора соответствующего инструментального материала.

### Материалы и методы исследования

В ходе литературного анализа было выявлено, что во всей взаимосвязи явлений при резании материалов определяющим является температурный фактор. На основании этого было принято решение провести исследования свойств инструментальных материалов от температуры.

На ранее разработанной установке были проведены исследования свойств инструментальных твердых сплавов на примере ВК8 на пластинках в состоянии поставки. По результатам исследований для более удобного и наглядного выявления температурного интервала максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин строится графическая зависимость изменения магнитного поля вихревых токов, наводимых в твердых сплавах от температуры нагрева. По построенной зависимости выявляется участок исследуемой характеристики с критическим изменением своих значений, затем графическим способом производится вычерчивание перпендикулярной линии оси ординат на 5% ниже от максимального значения исследуемой характеристики. Координаты точек пересечения построения прямых линий и основной кривой графика принимают за границы, затем определяется значение температуры, соответствующей данным границам. Полученный температурный интервал  $\Delta \Theta_{\text{мр}}$ , °С, с границами, выявленными графическим способом, принимают за интервал повышенных эксплуатационных характеристик режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом.

Данная методика позволяет определять температурные интервалы повышенных эксплуатационных характеристик режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, на примере сплава ВК8. Метод основывается на построении графической зависимости сменных режущих пластин из инструментальных твердых сплавов в температурном диапазоне, характерном для обработки металлов резанием до 1000°С, где выявляется диапазон температур с наибольшим изменением магнитного поля вихревых токов, наводимых в сменных режущих пластинках, выявляется величина погрешностей при измерениях, затем опре-

деляется температурный интервал максимальной работоспособности.

По полученным данным строится графическая зависимость ЭДС катушки автоколебательного контура, изменяемой под действием температур, характерных для процесса резания (рис 1.)

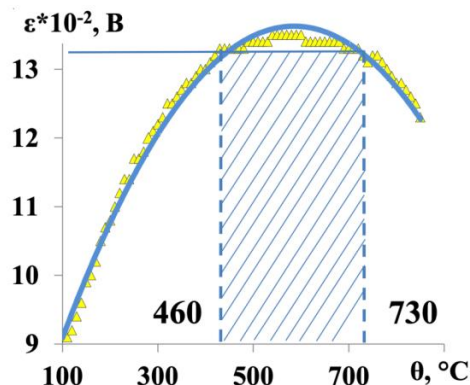


Рис. 1. График зависимости ЭДС катушки автоколебательного контура с помещенной во внутрь сменной режущей пластиной из сплава ВК8 (460–730°С) от температуры

Fig. 1. Graph of dependence of the EMF of the coil of the auto-oscillating circuit with a replaceable cutting plate made of WC8 (92% WC+8%Co) (460–730°С) placed inside on the temperature

Данные исследования были проведены на одном представителе группы однокарбидных твердых сплавов. Для дальнейшего исследования свойств инструментальных твердых сплавов необходимы исследования непосредственно в процессе механической обработки.

### Полученные результаты и их обсуждение

С этой целью проведены исследования при точении заготовки из стали 12Х18Н10Т диаметром 120–130 мм и длиной 600 мм резцами со сменными многогранными пластинами из твердых сплавов ВК8, Т5К10 и Т14К8 на станке 1К62. В табл. 1 и 2 приведены режимы резания и геометрия режущей части инструментов, используемых при экспериментальных исследованиях.

Таблица 1. Режимы резания

Table 1. Cutting modes

| 12Х18Н10Т (0,12%С + 18%Cr + 10%Ni + 10%Ti + 61,88%Fe) |                         |                                    |                     |
|---|-------------------------|------------------------------------|---------------------|
| Глубина   | Подача                  | Скорость резания                   | Температура резания |
| $t = 0,5 \text{ мм}$                                  | $s = 0,2 \text{ мм/об}$ | $v = 25\text{--}305 \text{ м/мин}$ | 100–1000°С          |

Таблица 2. Геометрия режущей части инструментов

Table 2. Geometry of the cutting part of the tools

| Главный угол в плане | Вспомогательный угол в плане | Передний угол       | Задний угол                    | Радиус при вершине   |
|----------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|
| $\varphi = 45^\circ$ | $\varphi_1 = 10^\circ$       | $\gamma = 10^\circ$ | $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$ | $R = 1,0 \text{ мм}$ |

Усилия резания измерялись трехкомпонентным электроиндуктивным динамометром. Силы резания на задней поверхности определялись по методу Н. Н. Зорева [7], основанному на сравнении сил при различных величинах износа по задней поверхности. Измерение микротвердости прирезцової стороны стружки  $H_3$  и микротвердости ее основного сечения  $H'_3$  производилось на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой на алмазную пирамиду 100 г. Средняя температура контакта измерялась методом естественной термопары. Характер кривых  $\mu' = f(v)$ , выражающих зависимость коэффициента трения на задней поверхности от скорости резания, и их взаимное расположение для различных твердых сплавов в основном связаны с влиянием скорости резания как температурного фактора, снижающего прочность контактного слоя обрабатываемого материала, как скоростного фактора, приводящего к упрочнению контактного слоя, как температурного фактора, изменяющего закономерности наростообразования, схватывания и образования окисных пленок. Кривая  $\mu' = f(v)$  построена по исследованиям А.Д. Макарова [11] (рис. 2), которые показали, что для всех рассматриваемых твердых сплавов кривые  $\mu' = f(v)$  носят экстремальный характер, но работа трения и коэффициент трения на задней поверхности в значительной мере определяют стойкость инструмента  $T$ , наклеп  $H_d$  и высоту микронеровностей  $R_z$  обработанной поверхности. В связи с этим можно ожидать, что для данных твердых сплавов зависимости  $\mu' = f(v)$ ,  $H_d = f(v)$ ,  $l_m = f(v)$  и  $R_z = f(v)$  также будут иметь экстремальный характер.

Исследования показали также, что скорости резания, соответствующие точкам минимума  $\mu' = f(v)$ , являются оптимальными по интенсивности износа инструмента, наклепу и шероховатости обработанной поверхности. Для рассматриваемых твердых сплавов получились следующие значения оптимальных скоростей резания и соответствующие им значения  $\mu'_{\min}$  (табл. 3).

Характерно, что семейства кривых  $\mu' = f(v)$ ,  $H_d = f(v)$ ,  $l_m = f(v)$  и  $R_z = f(v)$  для разных твердых сплавов располагаются в одной и той же последовательности. Твердый сплав ВК8 имеет большую величину  $\mu'$ , более высокую интенсивность изнашивания (меньшую длину пути резания  $l_m$  до выбранного критерия) и, как следствие, худшие показатели качества обработанной поверхности ( $H_d$  и  $R_z$ ). Наименьшие значения  $\mu'$ ,  $l$ ,  $H_d$  и  $R_z$  получаются при применении резцов, оснащенных твердым сплавом Т14К8. Таким образом, путем выбора соответствующего инструментального материала можно в некоторых пределах регулировать интенсивность изнашивания инструмента, точность обработки, а также наклеп и величину шероховатости обработанной поверхности. Попутно было исследовано влияние скорости резания и инструментального материала на усадку стружки  $\xi$ , микротвердость основного сечения стружки  $H'_3$  и ее прирезцової стороны  $H_3$ , а также средний коэффициент трения на передней поверхности инструмента  $\mu$  (см. рис. 2). Кривая  $\mu = f(v)$  построена по исследованиям А.Д. Макарова [11].

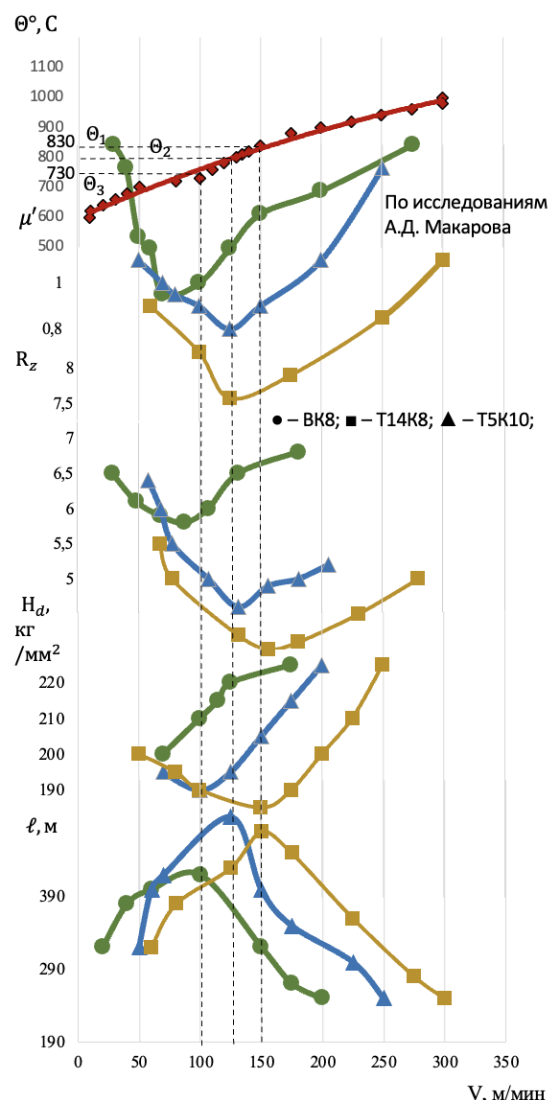


Рис. 2. Влияние инструментального материала на контактные явления на задней поверхности резца: ● – ВК8; ▲ – Т5К10; ■ – Т14К8

Fig. 2. The effect of tool material on contact phenomena on the back surface of the cutter: ● is WC8 (92% WC+8% Co); ▲ is TiC5C10 (85% WC+5% TiC+10% Co); ■ is TiC14C8 (78% WC+14% TiC+8% Co)

Таблица 3. Скорости резания и значение коэффициента трения

Table 3. Cutting speeds and friction coefficient value

| Твердый сплав | ВК8  | Т5К10 | Т14К8 |
|---------------|------|-------|-------|
| $v$ , м/мин   | 80   | 136   | 150   |
| $\mu'_{\min}$ | 1,04 | 0,83  | 0,58  |

Эти данные показывают, что зависимости  $\xi = f(v)$  и  $H'_3 = f(v)$  имеют одинаковый характер. Чем выше скорость резания, тем меньше усадка стружки и меньше микротвердость ее основного сечения. В исследованном диапазоне скоростей наименьшая усадка и наименьшая микротвердость  $H'_3$ , наблюдается для твердого сплава Т14К8, а наибольшие значения  $\xi$  и



$H_3$  — для твердого сплава ВК 8. Такое соответствие между величинами  $\xi$  и  $H_3$  для различных твердых сплавов не является неожиданным, так как усадка стружки и ее микротвердость являются следствием одного процесса пластической деформации в зоне стружкообразования.

Степень пластического деформирования прирезцовой стороны стружки определяется условиями трения на передней поверхности, поэтому микротвердость  $H_3$  прирезцовой стороны должна находиться в тесной взаимосвязи (корреляции) со средним коэффициентом трения на передней поверхности.

Исследования показывают (рис. 3), что семейства кривых  $\mu = f(v)$  и  $H_3 = f(v)$  для различных твердых сплавов располагаются в одинаковой последовательности, а минимальные значения  $\mu$  и  $H_3$  наблюдаются при одних и тех же скоростях резания, которые для разных твердых сплавов различны.

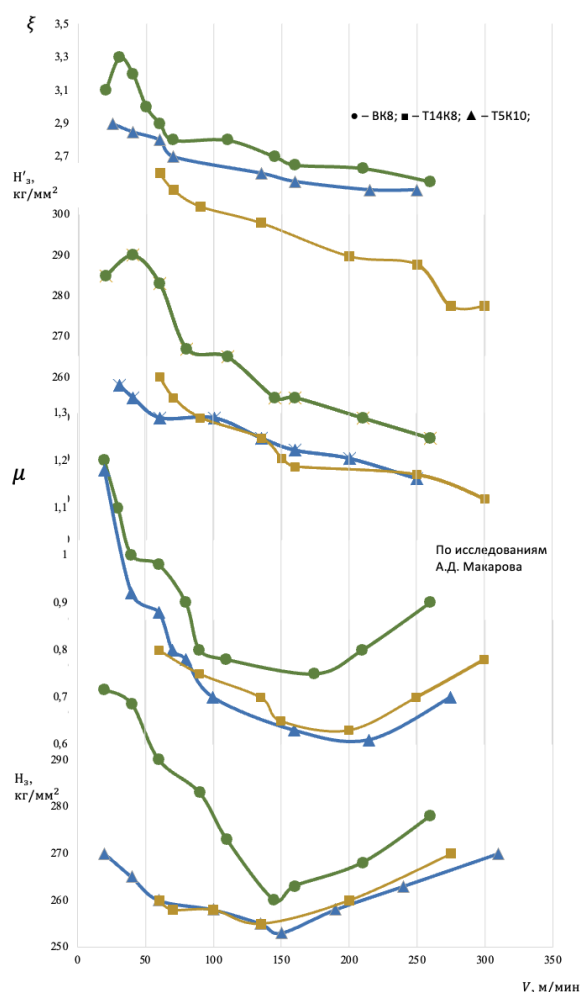


Рис. 3. Влияние инструментального материала на контактные явления на передней поверхности резца: ● – ВК8; ▲ – Т5К10; ■ – Т14К8

Fig. 3. The effect of tool material on contact phenomena on the front surface of the cutter: ● is WC8 (92% WC+8% Co); ▲ is TiC5K10 (85% WC+5% TiC+10% Co); ■ is TiC14K8 (78% WC+14% TiC+8% Co)

## Заключение

1. Проведенные исследования показали, что интенсивность изнашивания инструмента, величина шероховатости и наклеп обработанной поверхности находятся в корреляционной взаимосвязи. Путем выбора соответствующей марки инструментального материала можно в некоторых пределах регулировать не только стойкость инструмента, но и характеристики качества обработанной поверхности детали.

2. Инструментальный материал, который имеет наиболее высокий коэффициент трения по задней поверхности, имеет наиболее интенсивный износ, что обуславливается большей величиной наклепа и вследствие этого более высокой шероховатостью обработанной поверхности.

3. Твердость основного сечения стружки коррелирует с коэффициентом усадки стружки. Твердость прирезцовой стороны стружки совпадает с коэффициентом трения по передней поверхности. Из графика следует, что зависимости  $\xi = f(v)$  и функция  $\mu = f(v)$  могут иметь экстремальный характер.

4. Полученный температурный диапазон для представителя однокарбидных твердых сплавов соответствует максимальному пути резания. Это может свидетельствовать о том, что представленная методика может распространяться и на другие группы инструментальных твердых сплавов.

## Список источников

1. Бобров В.Д. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. 448 с.
3. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высш. шк., 2009. 534 с.
4. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.
5. Григорьев С.Н., Терешин М.В. Повышение использования ресурса инструмента путем управления процессом резания по максимальной температуре // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 4. С. 3-6.
6. Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 8. С. 53-60. EDN UAADXX.
7. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
8. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ инструмента при резании // Вестник машиностроения. 1995. Вып. №1. С. 26-31.
9. Креймер Г.С. Прочность твердых сплавов. М.: Металлургия, 1971. 247 с.
10. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

11. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
12. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 148 с.
13. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
14. High performance composite materials created through advanced techniques / I. Carceanu, G. Cosmeleată, B. Ghiban, M. Balanescu, I. Nedelcu // *Materiale Plastice*. 2007, vol. 44, pp. 321-325.
15. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining / C. Ferri, T. Minton, S.B. Ghani, K. Cheng // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014, vol. 228, pp. 135-145.
16. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization / J. Kümmel, D. Braun, J. Gibmeier, J. Schneider, C. Greiner, V. Schulze, A. Wanner // *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 215, pp. 62-70.
17. Machining of Aerospace Material - Ti (grade-2) alloy: Modelling and Optimization / Munish Kumar Gupta, Pardeep Kumar Sood, Gurraj Singh, Vishal S. Sharma Sustainable // *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 33, pp.133-138.
18. Murthy K.S., Rajendran I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012, vol. 34, pp. 253-261.
19. Energy efficient process planning based on numerical simulations / R. Neugebauer, C. Hochmuth, G. Schmidt, M. Dix // 17<sup>th</sup> CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. 2011, vol. 223, pp. 212-221.
20. Nurulamin A., Jaafar I., Zubaire W. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting // *IJUM Engineering Journal*. 2010, no. 11, pp. 124-126.
21. Patwari A., Amin N., Faris W. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations // *Advanced Materials Research*. 2010, no. 83, pp. 637-645.
22. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools / W. Tillmann, C. Schaak, D. Biermann, R. Abmuth, S. Goeke // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 181, pp. 127-135.
4. Granovsky G.I., Granovsky V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 304 p. (In Russ.)
5. Grigoriev S.N., Tereshin M.V. Increase of the tool resource utilisation by controlling the cutting process by the maximum temperature. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2011;(4):3-6. (In Russ.)
6. Dreval A.E., Malkova L.D. Joint influence of machining parameters on the value of cutting force components. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2007;(8):53-60. (In Russ.) EDN UAADXX.
7. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Issues of mechanics of metal cutting process]. Moscow: Mashgiz, 1956, 368 p. (In Russ.)
8. Kabaldin Yu. G. Friction and tool wear during cutting. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research]. 1995;(1):26-31. (In Russ.)
9. Kramer G.S. *Prochnost tvorydykh splavov* [Strength of hard alloys]. Moscow: Metallurgy, 1971, 247 p. (In Russ.)
10. Loladze T.N. *Prochnost i iznosostoikost rezhushchego instrumenta* [Strength and wear resistance of a cutting tool]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 320 p. (In Russ.)
11. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimisation of cutting processes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976, 278 p. (In Russ.)
12. Poletika M.F. *Kontaktnye nagruzki na rezhushchikh poverkhnostyakh instrumenta* [Contact loads on the cutting surfaces of the tool]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969, 148 p. (In Russ.)
13. Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [Method of similarity in metal cutting]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 152 p. (In Russ.)
14. Carceanu I., Cosmeleată G., Ghiban B., Balanescu M., Nedelcu I. High performance composite materials created through advanced techniques. *Materiale Plastice*. 2007;44:321-325.
15. Ferri C., Minton T., Ghani S.B., Cheng K. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014;228:135-145.
16. Kümmel J., Braun D., Gibmeier J., Schneider J., Greiner C., Schulze V., Wanner A. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;215:62-70.
17. Munish Kumar Gupta, Pardeep Kumar Sood, Gurraj Singh, Vishal S. Sharma. Sustainable Machining of Aerospace Material - Ti (grade-2) alloy: Modelling and Optimization. *Journal of Cleaner Production*. 2017;33:133-138.
18. Murthy K.S., Rajendran I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012;34:253-261.
19. Neugebauer R., Hochmuth C., Schmidt G., Dix M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. 17<sup>th</sup> CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. 2011;223:212-221.

## References

1. Bobrov V.D. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 344 p. (In Russ.)
2. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Cutting of materials. Thermomechanical approach to the system of correlation in cutting]. Moscow: Publishing House of Bauman MSTU, 2001, 448 p. (In Russ.)
3. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]. Moscow : Vysshaya shkola, 2009, 534 p. (In Russ.)

20. Nurulamin A., Jaafar I., Zubaire W. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting. *IJUM Engineering Journal*. 2010;(11):124-126.
21. Patwari A., Amin N., Faris W. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations. *Advanced Materials Research*. 2010;(83):637-645.
22. Tillmann W., Schaak C., Biermann D., Abmuth R., Goeke S. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;181:127-135.

Поступила 16.05.2025; принята к публикации 24.07.2025; опубликована 25.12.2025  
Submitted 16/05/2025; revised 24/07/2025; published 25/12/2025

**Артамонов Евгений Владимирович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: artamonov@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3099-4435

**Штин Антон Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: shtin\_as@mail.ru. ORCID 0000-0002-7000-6761

**Тверяков Андрей Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, директор нефтегазового института, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6441-2559

**Василега Дмитрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.  
Email: vasilegads@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7618-7906

**Evgeny V. Artamonov** – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Machine Tools, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
Email: artamonov@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3099-4435

**Anton S. Shtin** – PhD(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machine Tools, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
Email: shtin\_as@mail.ru. ORCID 0000-0002-7000-6761

**Andrey M. Tveryakov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Oil and Gas Institute, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6441-2559

**Dmitry S. Vasilega** – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machine Tools, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
Email: vasilegads@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7618-7906