

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-4-10](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-4-10)



УДК 621.9.025

UDC 621.9.025

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ВВЕДЕНИЕМ В ЗОНУ РЕЗАНИЯ ЭНЕРГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ**

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF TURNING HEAT-RESISTANT ALLOYS BY INTRODUCING THE ENERGY OF AN ULTRASONIC FIELD INTO THE CUTTING ZONE**

**Храмов Александр Владимирович**, президент ГК «ХАЛТЕК», г. Ульяновск, e-mail: [Aleksander.Khramov@haltec.ru](mailto:Aleksander.Khramov@haltec.ru)

**Khramov Alexander Vladimirovich**, President of HALTEK Group of Companies, Ulyanovsk, e-mail: [Aleksander.Khramov@haltec.ru](mailto:Aleksander.Khramov@haltec.ru)

**Горшков Максим Геннадьевич**, вед. инженер ГК «ХАЛТЕК», г. Ульяновск, e-mail: [maksim.gorshkov@haltec.ru](mailto:maksim.gorshkov@haltec.ru)

**Gorshkov Maxim Gennadievich**, Lead Engineer of the HALTEK Group of Companies, Ulyanovsk, e-mail: [maksim.gorshkov@haltec.ru](mailto:maksim.gorshkov@haltec.ru)

**Нгуен Хань Тоан**, Хынгинский педагогический технический университет, ст. преподаватель, г. Ханой, e-mail: [mr.toannk@gmail.com](mailto:mr.toannk@gmail.com)

**Nguyen Hanh Toan**, Senior Lecturer, Hungien Pedagogical Technical University, Hanoi, e-mail: [mr.toannk@gmail.com](mailto:mr.toannk@gmail.com)

✉<sup>1</sup> **Киселев Евгений Степанович**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, e-mail: [kec.ulstu@mail.ru](mailto:kec.ulstu@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Kiselev Evgeny Stepanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, e-mail: [kec.ulstu@mail.ru](mailto:kec.ulstu@mail.ru)

**Аннотация.** Применение труднообрабатываемых жаропрочных сплавов находит широкое распространение в конструкциях авиационных двигателей и газоперекачивающих агрегатов. Как правило, из них изготавливают тонкостенные оболочковые конструкции, обеспечивая высокую плотность компоновки (например – лопатки, моноколесы). Особенностью изготовления подобных конструкций является малый (по сравнению с занимаемым объемом всего изделия) объем металла, в котором распределяется возникающая при формообразовании теплота. Учитывая низкую теплопроводность таких сплавов (до 4-5 раз меньшую по сравнению со сталями) формообразование

**Annotation.** The use of difficult-to-process heat-resistant alloys is widely used in the design of aircraft engines and gas pumping units. As a rule, thin-walled shell structures are made from them, providing a high density of the layout (for example, blades, electric uni-cycles). The peculiarity of the manufacture of such structures is a small (compared to the occupied volume of the entire product) volume of metal, in which the heat generated during shaping is distributed. Given the low thermal conductivity of such alloys (up to 4-5 times less compared to steels), the shaping of parts from them is associated with the risk of warping in combination with low productivity of blade processing with carbide tools. More effective, but little studied is the processing with tools made of mineral

деталей из них сопряжено с опасностью возникновения короблений в сочетании с низкой производительностью лезвийной обработки инструментами из твердого сплава. Более эффективна, но мало исследована обработка инструментами из минералокерамики с введением в зону резания энергии ультразвукового поля. Цель исследований – отработать высокопроизводительную технологию предварительной обработки заготовок из жаропрочных сплавов инструментами из минералокерамики, отличающуюся минимальной глубиной дефектов в поверхностном слое. Исследования проводились на станочном оборудовании при изготовлении нежестких деталей летательных аппаратов точением заготовок из жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР резцами из минералокерамики с введением в зону обработки энергии УЗ-поля. Установлено, что использование УЗ-колебаний при предварительной обработке минералокерамическими инструментами без СОЖ позволяет уменьшить глубину дефектного слоя до полутора раз и увеличить производительность до 30 раз. Учитывая уменьшение глубины дефектного слоя, появляется возможность снижения припусков на окончательную обработку, а следовательно, уменьшения длительности технологического процесса и себестоимости изготовления деталей.

**Ключевые слова:** ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ, МИНЕРАЛОКЕРАМИКА, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОЛЕ, ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Постоянное развитие техники на современном этапе требует использования деталей, которые имеют тонкие стенки (как с целью экономии материала и облегчения конструкции в целом), отличающихся высокой прочностью и теплостойкостью. Сейчас их количество существенно увеличивается в общей номенклатуре деталей, изготавливаемых механической обработкой со снятием припусков. Тонкостенные оболочковые конструкции, обеспечивая высокую плотность компоновки, находят широкое применение в самых разных отраслях промышленности и, что особенно важно, в таких областях, как авиационное моторостроение, самолето- и ракетостроение, криогенная техника, космических и военно-промышленных разработках.

ceramics with the introduction of the energy of the ultrasonic field into the cutting zone. The purpose of the research is to develop a high-performance technology for pre-processing workpieces made of heat-resistant alloys with tools made of mineral ceramics, characterized by a minimum depth of defects in the surface layer.

**Methods.** The research was carried out on machine tools in the manufacture of non-rigid parts of aircraft by turning blanks from the heat-resistant alloy HN45MVTYUBR with cutters made of mineral ceramics with the introduction of the energy of the ultrasonic field into the processing zone.

It has been established that the use of ultrasonic vibrations during pretreatment with mineral-ceramic tools without coolant can reduce the depth of the defective layer by up to one and a half times and increase productivity by up to 30 times.

Taking into account the reduction in the depth of the defective layer, it becomes possible to reduce the allowances for final processing, and consequently, to reduce the duration of the technological process and the cost of manufacturing parts.

**Keywords:** HEAT-RESISTANT ALLOY, MINERAL CERAMICS, PERFORMANCE, SURFACE QUALITY, ULTRASONIC FIELD, TURNING.

Особенностью современного механообрабатывающего производства является необходимость изготовления все увеличивающегося количества сложных и нежестких, тонкостенных деталей в различных машинах и механизмах, прежде всего в летательных аппаратах (ЛА). Последнее объясняется, с одной стороны, увеличением скоростей их исполнительных движений (следовательно, стремлением уменьшить инерционные нагрузки), с другой - снятием почти полных прежних ограничений у конструкторов в создании сложных деталей ввиду высоких технологических возможностей современных 3-х и 5-ти осевых станков и обрабатывающих центров с ЧПУ. К этому можно добавить и еще одну: уменьшение конструкторской жесткости, как правило, сопровождается одновременным использованием в качестве конструкционных материалов высокопрочных, следовательно, как правило труднообрабатываемых сталей и сплавов для сохранения необходимой прочности при уменьшении сечений изготавливаемых деталей. В качестве материалов для таких деталей чаще других используются коррозионноустойчивые и жаропрочные стали, а также жаропрочные сплавы на основе титана и никеля. Общеизвестно, что доля титановых и жаропрочных сплавов в конструкции авиационных двигателей четвертого поколения на 2004 год составляла порядка 89 % [1, 2], в двигателях пятого поколения этот процент еще выше. Проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств при изготовлении нежестких деталей из труднообрабатываемых материалов, в которых возникающие из-за теплосилового напряжения и структурно-фазовых превращений остаточные напряжения любого знака способны вызвать значительные изменения в форме и пространственной ориентации, стоит существенно острее, чем для других конструкционных материалов. Это объясняется тем, что их тепло- и температуропроводность до 4-5 раз меньше, чем у конструкционных углеродистых сталей и вся теплота, возникающая в зоне резания, локализуется в поверхностном слое (ПС) обрабатываемой заготовки. На практике это выливается в необходимость существенного уменьшения элементов режима, а в некоторых случаях, даже в подборке опытным путем последовательности изготовления. Механическую обработку заготовок деталей, обладающих сложной пространственной формой, чаще всего ведут на дорогостоящих обрабатывающих центрах, для которых подобные потери производительности недопустимы. Очевидно, что высокопроизводительный съем припусков с заготовок из любых конструкционных материалов сопровождается высокой теплосилового напряженностью процесса обработки. Это приводит к возникновению в ПС заготовок из труднообрабатываемых материалов значительных по величине технологических остаточных напряжений (ТОН), негативное влияние которых на эксплуатационные характеристики изготавливаемых деталей общеизвестны. Традиционные технологии обработки заготовок из жаропрочных сплавов, не позволяют достичь высоких значений элементов режима резания (скорость резания, подача). Это обусловлено их физико-механическими свойствами, такими как способность материала сохранять исходную прочность и твердость при высоких температурах, возникающих в зоне резания, малая теплопроводность, способствующая недостаточному отводу тепла из контактной зоны инструмента и заготовки, а также наличие в их составе интерметаллидных или карбидных включений, приводящих к абразивному износу режущей кромки инструмента.

## 2 Материалы и методы

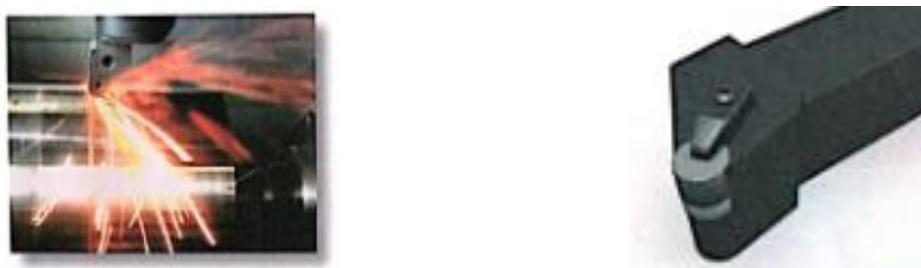
Наиболее эффективную обработку заготовок из жаропрочных сплавов на основе никеля можно вести инструментом, изготовленным из такого материала, для которого характерны повышенные режущие свойства, такие как высокие значения красностойкости, стабильность режущих свойств в широком диапазоне температур и сопротивляемость абразивному износу. Применяемые в настоящее время в качестве инструментальных материалов твердые сплавы не обладают в достаточной мере такими необходимыми характеристиками.

Низкая обрабатываемость жаропрочных сплавов определяется их физико-механическими свойствами. В этих условиях необходимо раскрыть причины, влияющие на их обрабатываемость, и найти способы и средства увеличения производительности их обработки на металлорежущих станках.

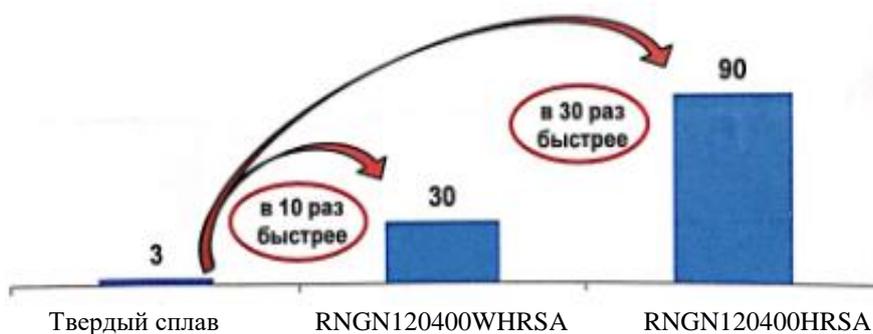
Основная структура большинства жаропрочных сплавов представляет собой обычно твердый раствор аустенитного класса с гранцентрированной кубической решеткой. При этом большая часть деформируемых жаропрочных сплавов принадлежит к типу дисперсионно твердеющих, т.е. в этих сплавах происходит выделение из твердого раствора структурной составляющей – второй фазы, отличной от его основы и рассеянной по всему объему сплава в тонкодисперсной форме.

Высокая дисперсность структуры препятствует возникновению и развитию процессов скольжения, при этом сопротивление ползучести сплава повышается.

Для жаропрочных сплавов на никелевой основе характерна значительная потеря прочности и облегчение процесса резания при температурах выше 800 °С. [2, 3]. Ранее выполненными в ГК "ХАЛТЕК" [3] установлено, что эффективность обработки заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе может быть увеличена при замене обычных режущих инструментов керамическими инструментами SSY (повышение производительности в 30 и более раз по сравнению с использованием твердосплавного инструмента, рис.) с одновременным увеличением скорости резания до 600 и более м/мин.



а) Керамический инструмент в авиации



б) Производительность Q<sub>min</sub>(см<sup>3</sup>/мин)

Пластина твердосплавная	Пластина керамическая RNGN120400WHRSA	Пластина керамическая RNGN120400HRSA
СОЖ	СОЖ	Обдув воздухом
A <sub>p</sub> = 1,5 мм	A <sub>p</sub> = 1,5 мм	A <sub>p</sub> = 1,5 мм
V = 20 м/мин	V = 200 м/мин	V = 600 м/мин
(n = 32 об/мин)	(n = 318 об/мин)	(n = 955 об/мин)
F = 3 мм/мин	F = 32 мм/мин	F = 96 мм/мин
(f = 0,1 об/мин)	(f = 0,1 об/мин)	(f = 0,1 об/мин)

в) технологические условия обработки металлов резанием с использованием резцов из твердосплавных и керамических материалов.

Рисунок – Результаты опытно-промышленных испытаний новых видов минералокерамики на производственном участке ГК «ХАЛТЕК»

Последнее объясняется высокими значениями контактной температуры (800 – 850 °С), что приводит к реализации процесса формообразования новых поверхностей в условиях термопластичности. Такая обработка сопровождается существенным уменьшением сил резания, что и объясняет причины резкого повышения производительности съема припуска [4-6]. Очевидно, что этот метод может быть использован только при предварительной (черновой) обработке, так как высокие контактные температуры в зоне резания неизбежно вызовут возникновение дефектного слоя. Дальнейшими исследованиями сотрудников ГК "ХАЛТЕК" и промышленной апробацией на ряде авиадвигательных предприятиях установлена высокая эффективность минералокерамических инструментов при черновой фрезерной и токарной обработке заготовок из жаропрочных сплавов без смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Однако, испытаниями ряда моторостроительных предприятий установлена глубина дефектного слоя в (0,2-0,3) мм. Это недопустимо для окончательно обработанных деталей, увеличивает продолжительность получистовой и окончательной обработки и неприемлемо при изготовлении тонкостенных нежестких деталей. Интенсификация процессов обработки резанием, уменьшение глубины распространения ТОН и уменьшение вероятности возникновения других дефектов в ПС обработанных деталей могут быть осуществлены путем внешних энергетических воздействий на контактирующие объекты [1, 7]. Одновременно это облегчит процесс формообразования новых поверхностей за счет снижения затрат на движение дислокаций, обеспечит уменьшение силы резания, но и снизит контактные температуры, что может уменьшить глубину дефектного слоя. Однако последнее, наоборот, может затруднить процессы формообразования. Это, неизбежно приведет к снижению производительности съема припусков, но может уменьшить глубину дефектного слоя изготавливаемых деталей [8-10]. Поэтому, поиск оптимальных условий обработки заготовок из жаропрочных сплавов является весьма актуальной проблемой для современного авиадвигательного и ракетостроения.

Из большого числа видов, форм и схем энергетических воздействий на процесс обработки резанием [1, 7] наиболее простым и экономичным является введение в зону контакта энергии ультразвукового (УЗ) поля. Учитывая, что введение УЗ-колебаний способствует снижению фрикционных процессов, следовательно, и контактных температур, целесообразность такого воздействия при обработке заготовок из жаропрочных сплавов керамическими инструментами требует экспериментального подтверждения.

### 3 Результаты исследований

Результатом многочисленных исследований, выполненных в различных странах, явилась возможность практическая реализации размерной механической обработки с УЗК путем использования специальных приспособлений и установок для наложения энергии ультразвукового поля на заготовку (инструмент, СОЖ, детали станка и технологической оснастки и др.) [1,2,7]. В настоящее время компанией DMG MORI разработана и серийно выпускается линейка из 18 моделей станков серии ULTRASONIC, в которой в конструкцию шпиндельного узла встроено устройство наложения УЗК на режущий инструмент. Подобными являются и станки AXILE Machining. Одновременно, серийно выпускаются ультразвуковые оправки (компания Altrasonic, CRENO Industry, Pulchertool), применение которых допустимо на обрабатываемых центрах с ЧПУ оснащенных шпинделями с конусом ISO40 (SK40, BT40) [1]. В этих условиях чрезвычайно важно выявить возможность снижения контактных температур без уменьшения интенсивности съема припуска за счет введения в зону контакта режущего инструмента с заготовкой энергии ультразвукового поля и предложить новые эффективные средства снижения себестоимости изготовления сложных нежестких деталей из жаропрочных хромоникелевых сплавов.

В ходе исследований получены предварительные результаты по оценке эффективности обработки точением заготовок из жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР (аналог сплава Inconel 718) всухую (обдув воздухом) резцами из минералокерамики RNGN120400HRSA серии SSY

(Ю. Корея) с введением в зону обработки энергии УЗ-поля. Эксперименты проводили на токарно-винторезном станке Quantum Opti D420x 1000 DPA. В процессе обработки измеряли составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  и крутящий момент  $M$  кр. с помощью динамометра УДМ-600, оснащенного тензорезисторами Kuowa kfg-5-120-c1-11. Кроме того, с помощью тепловизора-пирометра TemPro -1200/1600/2200 контролировали температуру на передней поверхности минералокерамической пластины в максимальной близости от зоны контакта с обрабатываемой заготовкой. В первой серии осуществляли обработку заготовок без введения в зону формообразования энергии ультразвуковых колебаний, во второй, на режущий инструмент накладывали УЗК от ультразвукового генератора УЗГ 641 А, частотой  $f = 18,6$  кГц и амплитудой  $A = 10$  мкм. В обеих сериях использовали элементы режима резания: глубина резания  $t = 1,5$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об, скорость резания  $V = 600$  м/мин

Введение в зону формообразования энергии УЗ-колебаний, по мнению авторов, может также изменить характер движения дислокаций в зоне формообразования и уменьшить величину дефектного слоя. Для проверки этого предположения до и после обработки образцы для исследований подвергались оценке неразрушающим методом фазовых превращений в поверхностном слое металлов и сплавов на рентгеновском измерительном комплексе "РИКОР-7" и технологических остаточных напряжений I рода на приборе СИТОН "АРМ".

#### 4 Обсуждение и заключение

Как показывает анализ результатов исследований, сделанные предположения полностью подтвердились. Введение в зону точения энергии УЗ-колебаний уменьшает контактную температуру на передней поверхности резца на (12-17) %, однако снижения производительности обработки (оценивали по составляющим силы резания) не наблюдалось. Контроль параметров качества показал, что глубина дефектного слоя (оценивали по величине и глубине распространения технологических остаточных напряжений и фазовым изменениям) уменьшилась в 1,45 раза.

Таким образом, выполненные исследования доказали целесообразность ввода в зону точения заготовок из жаропрочных сплавов энергии УЗ-поля.

#### Список литературы

- 1 Киселев, Е. С. Современные ультразвуковые размерные технологии механической обработки заготовок из труднообрабатываемых и композиционных материалов / Е. С. Киселев // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 9 (111). – С. 33-39.
- 2 Киселёв, Е. С. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей / Е. С. Киселёв, О. В. Благовский. С.- Петербург: изд. «Лань». – 2020. – 160 с.
- 3 Храмов, А. В. Фрезерная обработка заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе монолитными фрезами / А.В. Храмов, Е. Н. Лексин, М. Г. Горшков, Е.С. Киселев. // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2018. – Т.1. – С. 326-329.
- 4 Cheng, Yu Mechanical properties and toughening mechanisms of graphene platelets reinforced  $Al_2O_3/TiC$  composite ceramic tool materials by microwave sintering / Yu Cheng, Yong Zhang, Zengbin Yin [et al.] // Materials Science & Engineering A. – 2016. – V. 680. – P. 190-196.
- 5 Vereschaka, A.A. Nano-scale multi-layered coatings for improved efficiency of ceramic cutting tools /A.A. Vereschaka, Sergey N. Grigoriev, Marina A. Volosova, Andre Batako, Anatoly S. Vereschaka, Nikolay N. Sitnikov, Anton E. Seleznev // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – P. 1-17
- 6 Solis, N.W. Black Zirconia-Graphene Nanocomposite Produced by Spark Plasma Sintering / N.W. Solis, P. Peretyagin, A. Seleznev, R. Torresillas, J.S. Moya // Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2016): Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. AIP Conf. Proc. 1785, 2016.

- 7 Garcia Navas, V. Surface integrity of rotary ultrasonic machined  $ZrO_2 - TiN$  and  $Al_2O_3 - TiC - SiC_w$  ceramics / V. Garcia Navas, A. Sanda, C. Sanz [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35 (14). – P. 3927-3941
- 8 Ceramic insert improves cast iron milling // Metal Powder Report. – 2014. – V. 69(2). – P. 46
- 9 Zou, Bin Effects of superfine refractory carbide additives on microstructure and mechanical properties of  $TiB_3 - TiC + Al_2O_3$  composite ceramic cutting tool materials / Bin Zou, Wenbin Ji, Chuanzhen Huang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – V. 585. – P. 192-202
- 10 Григорьев, С.Н. Диагностика и контроль керамического инструмента при высокоскоростном фрезеровании закаленных сталей на станках с ЧПУ / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова // Измерительная техника. – 2015. – №7. – С. 7-10.

### References

- 1 Kiselev, E. S. Modern ultrasonic dimensional technologies of mechanical processing of workpieces from hard-to-process and composite materials / E. S. Kiselev // High-tech technologies in mechanical engineering. – 2020. – № 9 (111). – Pp. 33-39.
- 2 Kiselev, E. S. Control of the formation of residual stresses in the manufacture of responsible parts / E. S. Kiselev, O. V. Blagovsky. St. Petersburg: ed. "Doe". – 2020. – 160 p.
- 3 Khramov, A.V. Milling of blanks from heat-resistant nickel-based alloys with monolithic cutters / A.V. Khramov, E. N. Leksin, M. G. Gorshkov, E.S. Kiselev. // Aerospace engineering, high technologies and innovations. – 2018. – Vol.1. – pp. 326-329.
- 4 Cheng, Yu Mechanical properties and hardening mechanisms of graphene platelets reinforced  $Al_2O_3/TiC$  composite ceramic tool materials by microwave sintering / Yu Cheng, Yong Zhang, Zengbin Yin [et al.] // Materials Science & Engineering A. – 2016. – V. 680. – P. 190-196.
- 5 Vereschaka, A.A. Nano-scale multi-layered coatings for improved efficiency of ceramic cutting tools / A.A. Vereschaka, Sergey N. Grigoriev, Marina A. Volosova, Andre Batako, Anatoly S. Vereschaka, Nikolay N. Sitnikov, Anton E. Seleznev // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – P. 1-17
- 6 Solis, N.W. Black Zirconia-Graphene Nanocomposite Produced by Spark Plasma Sintering / N.W. Solis, P. Peretyagin, A. Seleznev, R. Torresillas, J.S. Moya // Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2016): Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. AIP Conf. Proc. 1785, 2016.
- 7 Garcia Navas, V. Surface integrity of rotary ultrasonic machined  $ZrO_2 - TiN$  and  $Al_2O_3 - TiC - SiC_w$  ceramics / V. Garcia Navas, A. Sanda, C. Sanz [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – V. 35 (14). – P. 3927-3941
- 8 Ceramic insert improves cast iron milling // Metal Powder Report. – 2014. – V. 69(2). – P. 46
- 9 Zou, Bin Effects of superfine refractory carbide additives on microstructure and mechanical properties of  $TiB_3 - TiC + Al_2O_3$  composite ceramic cutting tool materials / Bin Zou, Wenbin Ji, Chuanzhen Huang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – V. 585. – P. 192-202
- 10 Grigoriev, S.N. Diagnostics and control of ceramic tools during high-speed milling of hardened steels on CNC machines / S.N. Grigoriev, M.A. Volosova // Measuring equipment. – 2015. – No. 7. – pp. 7-10.

© Храмов А.В., Горшков М.Г., Нгуен Х.Т., Киселев Е.С., 2023