

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-25-33

АБРАЗИВНЫЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Борис Яковлевич Мокрицкий^{1✉}, Андрей Александрович Непогожев², Александр Александрович Скрипилёв³

^{1,3} Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

² Московский машиностроительный завод «Авангард», Москва, Россия

¹ boris@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

² andrey.nepogozhev@gmail.com

³ skripilev.aal@email.knastu.ru

Аннотация

Цель работы: повышение эффективности шлифования путем выбора рациональных характеристик абразивного инструмента, преимущественно по критерию обеспечения необходимой температуры в инструментальном материале, без прижогов с обеспечением требуемой точности и шероховатости обработанных поверхностей.

Результаты исследования: разработаны рекомендации по выбору рационального абразивного инструмента, обеспечивающего минимальное разупрочнение материала шлифуемой детали, требуемую шероховатость поверхности, точность размеров и производительности обработки.

Выводы:

1. Цель достигнута путём уточнения концептуальных принципов и методологии рационального выбора абразивных инструментов.

2. Исследования позволили оценить температуры резания при шлифовании в зависимости от сочетания различных пар «инструмент-обрабатываемый материал». Результаты исследований дают возможность корректно выполнять выбор

шлифовального инструмента для различных материалов.

3. Подтвержден характер влияния температуры в зоне резания на вероятность возникновения прижогов и, соответственно, на разупрочнение поверхностного слоя деталей.

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса бесцентрового шлифования деталей из различных материалов, а именно: из коррозионностойкой стали марки 12X18H10T, никелевого сплава марки ХН60ВТ, сложнолегированной стали 12Х2НВФА и характерной конструкционной стали марки 30ХГСА.

Новизна работы: сформирован новый подход к рациональному выбору абразивного инструмента, основанный на моделировании процесса резания с учетом обеспечения требуемого качества и производительности обработки.

Ключевые слова: инструмент, шлифовальный круг, бесцентровое шлифование, обеспечение, качество, производительность, обработка.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393>.

Ссылка для цитирования:

Мокрицкий Б.Я. Абразивный металлорежущий инструмент для бесцентрового шлифования / Б.Я. Мокрицкий, А.А. Непогожев, А.А. Скрипилев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 11. – С. 25-33. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-25-33.

Original article

Open Access Article

ABRASIVE METAL CUTTING TOOL FOR CENTERLESS GRINDING

Boris Yakovlevich Mokritsky^{1✉}, Andrey Aleksandrovich Nepogozhev², Aleksandr Aleksandrovich Skripilyov³

^{1,3} Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

² Moscow Machine-Building Plant "Avangard", Moscow, Russia

¹ boris@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

² andrey.nepogozhev@gmail.com

³ skripilev.aal@email.knastu.ru

Abstract

The paper objective: to increase the efficiency of grinding by choosing the rational characteristics of the abrasive tool, mainly according to the criterion of ensuring the necessary temperature of the tool material, without burning, ensuring the required accuracy and roughness of the treated surfaces.

Research results: recommendations are developed on the choice of a rational abrasive tool that provides minimal softening of the part material being ground, the required surface roughness, dimensional accuracy and treatment performance.

Conclusions:

1. The objective is achieved by clarifying the conceptual principles and methods of rational choice of abrasive tools.

2. The studies allowed to estimate the cutting temperatures during grinding depending on the combination of different pairs of tool and treated material.

The research results make it possible to choose the grinding tool for various materials correctly.

3. The nature of temperature influence in the cutting zone on the probability of appearing burnings and, accordingly, on the softening of the surface layer of parts is confirmed.

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of centerless grinding of parts made of various materials, namely: corrosion-resistant steel grade 12X18N10T, nickel alloy grade XH60BT, composite steel 12X2HВФА and characteristic structural steel grade 30XГСА.

Novelty of the work: a new approach to the rational choice of an abrasive tool is formed, based on modeling the cutting process, taking into account the required quality and productivity of the treatment.

Keywords: tool, grinding wheel, centerless grinding, assurance, quality, productivity, treatment.

Funding: the study is supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393>.

Reference for citing:

Mokritsky BYa, Nepogozhev AA, Skripilyov AA. Abrasive metal cutting tool for centerless grinding. Transport Engineering. 2023; 11:25-33. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-25-33.

Введение

В условиях роста требований к производительности современных станков с ЧПУ, к качеству и точности изготовления деталей актуализируется необходимость совершенствования конструкции и качества металлорежущего инструмента.

В ряде отраслей отечественного и зарубежного машиностроения сложилось так, что затраты на инструмент в структуре себестоимости изготавливаемых изделий превышают 10%, что резко снижает эффективность производства. Соответственно, требуются меры по снижению затрат.

Такая ситуация возникает при шлифовании некоторых сталей и сплавов. Характерными примерами является алмазно-абразивная обработка коррозионноустойчивых сталей, сложнолегированных сталей, жаропрочных сплавов. При этом необходимость шлифования таких материалов постоянно возрастает с ростом производства

для авиации, судостроения, химического машиностроения.

В работе рассмотрены особенности и результаты выбора абразивного инструмента для бесцентрового шлифования группы деталей из сталей и сплавов, обработка которых затруднена. Исследования выполнялись с целью рационального выбора абразивного инструмента, формирования требований к нему на стадии проектирования.

В качестве критериев и ограничений использованы требования производительного шлифования без прижогов с обеспечением требуемой точности и шероховатости обработки. Разработаны соответствующие рекомендации, их применение позволило снизить трудоемкость выбора абразивного круга с 1,5 часа до 2 минут и уменьшить брак деталей до 0,1 % по причине прижогов поверхности и погрешности полученных размеров детали.

Методология исследования

В основу методологии исследования положено имитационное моделирование процесса резания в программной среде *Deform* [1] с последующей экспериментальной проверкой результатов.

В ходе работы решались ряд задач:

– анализ возможности использования программной среды *Deform* для исследования процесса бесцентрового шлифования, а также её адаптации под стоящие задачи исследования;

– выбор критериев и параметров, с помощью которых можно использовать

программную среду *Deform* для обеспечения рационального выбора абразивного инструмента, обеспечивающего эффективное шлифование при минимальном разупрочнении материала шлифуемой детали, обеспечении требуемой шероховатости поверхности, точности размеров детали и производительности обработки.

– выбор параметры и критерии, с помощью которых можно осуществлять выбор рациональных условий шлифования.

Обсуждение полученных результатов

На рис. 1 показаны диаграммы, характеризующие минимальные величины температуры в зоне резания в зависимости от применяемого абразивного инструмента для разных шлифуемых деталей, т.е. для

разных обрабатываемых материалов. Результаты получены [2] при использовании абразивного режущего инструмента 1 25A F60 O6V.



Рис. 1. Минимальные значения температуры в зоне резания при шлифовании разными абразивными инструментами заготовок деталей, выполненных из разных материалов

Fig.1. Minimum temperature values in the cutting zone when grinding work pieces of parts made of various materials with different abrasive tools

Из рис. 1 видно, что изменение температуры при применении разных абразивных инструментов для обработки заготовок деталей, выполненных из разных материалов, имеет место, но оно незначи-

тельно и происходит в диапазоне 550...570 °С. Из этого следует вывод: абразивный инструмент 1 25A F60 O6V универсален, он применим для любого из материалов рассмотренных деталей.

Вместе с тем, результаты имитационного моделирования в программной среде *Deform* показывают, что универсальность этого инструмента не обеспечивает его более высокую эффективность по сравнению с другими марками кругов. Т.е. в ряде случаев альтернативные инструменты обеспечивают меньшие температуры в зоне резания и являются рациональными решениями.

На рис. 2 показаны диаграммы, характеризующие [3, 4] максимальные величины температуры в зоне резания в зависимости от применяемого абразивного инструмента для разных шлифуемых деталей, т.е. для разных обрабатываемых материалов. Результаты получены при исследовании применения абразивных инструментов 1 25А F60 O6V, 1 25А F60 Q6V, 1 25А F80 O6V и 1 25А F80 N7V.

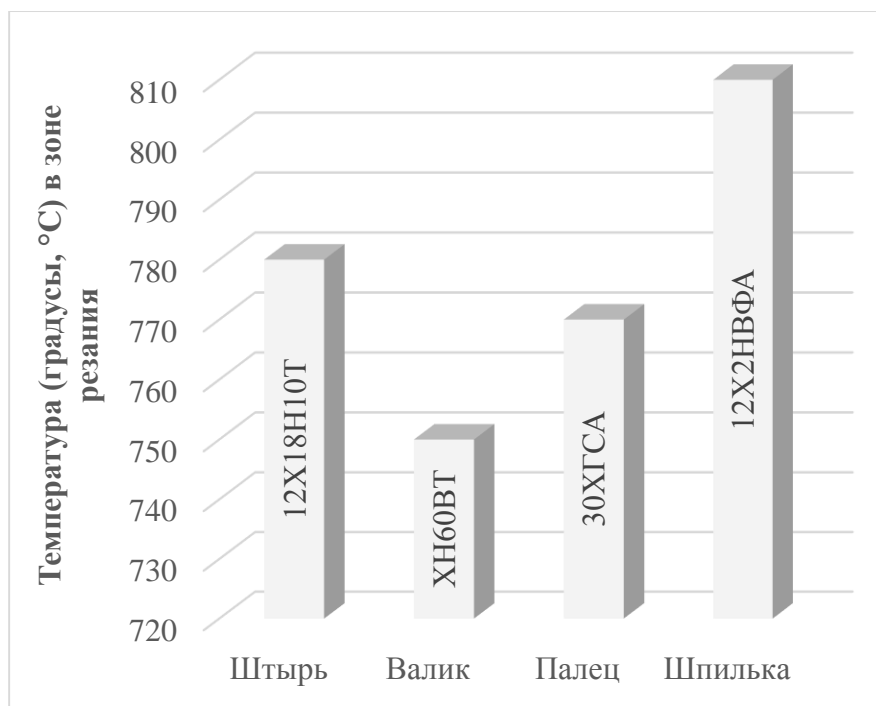


Рис. 2. Максимальные значения температуры в зоне резания при шлифовании разными абразивными инструментами заготовок деталей, выполненных из разных материалов

Fig. 2. Maximum temperature values in the cutting zone when grinding work pieces of parts made of various materials with different abrasive tools

Из диаграмм видно, что максимальные значения температуры в зоне резания существенно отличаются и изменяются в диапазоне 750...810 °С. Это более высокие температуры, по сравнению с результатами, показанными на рис. 1. Наименьшее значение температуры наблюдалось при обработке детали «Валик», выполненной из никелевого сплава марки ХН60ВТ при применении абразивного инструмента марки 1 25А F80 N7V. Наибольшее значение температуры выявлено при обработке детали «Шпилька», выполненной из высоколегированной стали марки 12Х2НВХА при применении

абразивного инструмента той же марки 1 25А F80 N7V. Из этого следует вывод: обработка одинаковым абразивным инструментом заготовок деталей, выполненных из разных материалов, приводит к совершенно разным температурам резания. Иначе говоря, рациональный выбор абразивного инструмента определяется свойствами материала и в общем случае отсутствует универсальное решение.

В табл. 1 представлены результаты зависимости параметра шероховатости *Ra* от глубины резания.

Таблица 1

Изменение шероховатости заготовки деталь «Штырь» после операции «Шлифование» шлифовальным кругом марки 1 25A F60 O6V в зависимости от глубины резания при частоте вращения ведущего круга 42 мин⁻¹

Table 1

Roughness change of pin workpiece after grinding operation with a grinding wheel of 1 25A F60 O6V grade, depending on the cutting depth at the rotation speed of the driving wheel 42 min⁻¹

Глубина резания, мм	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra, мкм, на примере обработки детали		
	1	2	3
0,05	0,84	0,81	0,80
0,10	0,96	0,94	0,92
0,15	1,23	1,20	1,19
0,20	2,74	2,71	2,70
0,25	3,58	3,56	3,54
0,30	4,25	4,22	4,21
0,35	5,91	5,88	5,87

Из табл. 1 следует, что глубина резания ощутимо влияет на шероховатость обработанной поверхности. С ростом глубины резания от 0,05 мм до 0,35 мм шероховатость ухудшается (растёт) с Ra 0,81 мкм до Ra 5,88 мкм. Столь значительный рост шероховатости свидетельствует о высокой степени влияния этого параметра на каче-

ство обработанной поверхности. Такую закономерность следует учитывать, при назначении режимов обработки.

Влияние параметров режима резания на стабильность получения размера детали при бесцентровом шлифовании показано в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Колебания размера детали в зависимости от глубины резания при частоте вращения ведущего круга 42 мин⁻¹ после операции «Шлифование»

Table 2

Variations in the part dimension depending on the cutting depth at the speed of the drive wheel 42 min⁻¹ after grinding operation

Глубина резания, мм	Диаметр, мм, на примере обработки детали «Штырь»			Среднеквадратичное отклонение размера, мм
	1	2	3	
0,05	10,938	10,933	10,929	0,004
0,10	10,931	10,927	10,923	0,003
0,15	10,929	10,923	10,920	0,004
0,20	10,923	10,918	10,916	0,003
0,25	10,916	10,912	10,909	0,004
0,30	10,897	10,891	10,887	0,005
0,35	10,876	10,871	10,868	0,003

Из табл. 2 видно, что разброс размеров детали после обработки незначителен. Зафиксированные отклонения (0,003 до 0,005 мм) сопоставимы с величиной шероховатости. При этом изменения размеров

носят случайный характер. Отсутствует корреляция этих колебаний с глубиной резания, в отличие от величины формируемой шероховатости.

Таблица 3

Изменение размера детали в зависимости от частоты вращения ведущего круга при глубине резания 0,1 мм после операции «Шлифование»

Table 3

Changing the part dimension depending on the rotation speed of the drive wheel at a cutting depth of 0.1 mm after grinding operation

Частота вращения ведущего круга, мин ⁻¹	Диаметр, мм, на примере обработки детали «Штырь»			Среднеквадратичное отклонение размера, мм
	1	2	3	
20	10,937	10,936	10,935	0,001
42	10,936	10,934	10,932	0,001
64	10,928	10,927	10,926	0,001
86	10,921	10,920	10,919	0,001
108	10,918	10,916	10,914	0,002
130	10,914	10,913	10,912	0,001
150	10,911	10,910	10,909	0,001

Данные, представленные в табл. 3 показывают, что влияние частоты вращения ведущего круга на точность обработки неоднозначное. Фактически получаемый размер коррелирует с частотой вращения подающего круга: с его увеличением съём металла растёт, диаметр монотонно уменьшается, хотя абсолютное значение этого уменьшения невелико – не более 0,02 мм. При этом стабильность размеров очень высока – разброс не более 0,001 мм. Таким образом, частоту вращения ведущего круга необходимо учитывать при высоких требованиях (6-7 квалитет) к исполнительным размерам.

Данные, приведенные в таблицах, показывают, что глубина резания и частота вращения ведущего круга оказывают влияние на размер обработанной детали, но при этом практически не влияют на стабильность получаемых размеров.

Полученные результаты не противоречат имеющимся [5-9] представлениям.

Оценку влияния температурно-силовых факторов процесса шлифования на физико-механические свойства обрабатываемых поверхностей попытались по параметрам твердости (шкала *HRB*) и микротвердости (*HV*). Результаты измерений были статистически обработаны, по результатам произведена аппроксимация табулированных данных линейными зависимостями. В табл. 4 приведены эти зависимости и первое приближение оценки их точности.

Анализ результатов, приведённых в табл. 4, позволяет сделать ряд выводов. Параметры твердости и микротвердости можно использовать в качестве критерия, учитывающих влияние режимов шлифования на физико-механические свойства обрабатываемых поверхностей. Прогнозирование изменения параметров твердости (микротвердости) можно выполнять по линейным зависимостям, полученным в ходе обработки экспериментальных данных.

Таблица обобщения формул, описывающих влияние ряда параметров на качество обработки детали

Table of formulas describing the influence of a number of parameters on the quality of part treatment

Параметры	Формулы, описывающие зависимости, дисперсия			
	Деталь «Штырь», сталь 12X18H10T	Деталь «Валик», сплав ХН60ВТ	Деталь «Палец», сталь 30ХГСА	Деталь «Шпилька», сталь 12Х2НВФА
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	$HRB = -67,87t + 36,957$ Дисперсия 0,9496	$HRB = -62,857t + 37,857$ Дисперсия 0,9299	$HRB = -37,14t + 47,0$ Дисперсия 0,9494	$HRB = -54,286t + 35,0$ Дисперсия 0,9093
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от частоты вращения ведущего круга n , мин ⁻¹	$HRB = -0,0982n + 32,571$ Дисперсия 0,936	$HRB = -0,0983n + 33,422$ Дисперсия 0,9662	$HRB = -0,09n + 47,0$ Дисперсия 0,9511	$HRB = -0,1377n + 35,66$ Дисперсия 0,9662
Зависимость микро-твердости обработанной поверхности детали от глубины резания t	Для круга марки 1 25А F80 O6V $HV = -3560,7t + 4667,1$ Дисперсия 0,9496 Для круга марки 1 25А F60 O6V $HV = -216,67t + 795,0$ Дисперсия 0,9308	$HV = -3328,6t + 4594,3$ Дисперсия 0,9051	$HV = -1785,7t + 4998,6$ Дисперсия 0,9812	$HV = -3428,6t + 4828,6$ Дисперсия 0,963

Заключение

В статье изложены новые научно обоснованные технические рекомендации, направленные на более корректное решение задачи выбора абразивного металлорежущего инструмента, а также уточнение режимов обработки, обеспечивающие повышение эффективности бесцентрового шлифования. Эти рекомендации относятся к инструментальному обеспечению операций шлифования деталей, выполненных из материалов, обработка которых вызывает сложности: коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т, никелевый сплав ХН60ВТ, конструкционные стали марок 30ХГСА и 12Х2НВФА.

Разработанные рекомендации предложены на основе ограничений и критериев. Основным ограничением является исключение прижогов шлифуемой заготовки деталей. Вторым ограничением является обеспечение настроечных размеров обработки и их стабильность. При выполнении этих двух ограничений дальнейшие проце-

дуры технической подготовки операции базируются на экономических критериях. Решение задачи повышения эффективности бесцентрового шлифования выполнено применительно к конкретной производственной задаче в условиях промышленного предприятия. Результаты использования результатов исследования позволили получить существенный экономический эффект.

Полученные результаты позволяют сделать следующие общие выводы.

1. Экспериментально найдены марки абразивных кругов, обеспечивающих наилучшие показатели для обработки каждой из групп конструкционных материалов (сталь 12Х18Н10Т, никелевый сплав ХН60ВТ, конструкционная сталь 30ХГСА, сложнолегированная конструкционная сталь 12Х2НВФА).

2. Имитационное моделирование в программной среде *Deform* позволяет прогнозировать температурно-силовые пара-

метры процесса шлифования при учете характеристик абразивного инструмента и конкретных условий обработки.

3. Спрогнозирована имитационным моделированием и подтверждена экспериментально возможность использования температурного параметра (минимальная температура в зоне резания) в качестве критерия для обеспечения рациональных условий обработки с позиций исключения прижогов шлифуемой заготовки деталей, обеспечения требующейся производитель-

ности обработки и качества обработанной поверхности (по точности размеров детали и шероховатости обработанной детали).

4. Полученные эмпирические зависимости описывают параметры твердости поверхностного слоя с достаточной для инженерной практики точностью.

6. Установлен характер влияния некоторых параметров режима резания на точность и шероховатость при бесцентровом шлифовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого; под общ. Ред. В.А. Залого.- Сумы.: Университетская книга. 2012. – 496 с.
2. Непогожев А.А., Желтухин А.В., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Эпельфельд А.В., Перетягин П.Ю. Плазменно – электролитные покрытия, стойкие при сварке трением с перемешиванием. Материалы XI международной конференции «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2018)». Сборник докладов. М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2018. 91 с.
3. Романенко А.М., Шатько Д.Б., Непогожев А.А., Караваев Я.С. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионно-стойких сталей на примере 12X18H10T. // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021; (3): 98-106.
4. Romanenko A., Shatko D., Nepogozhev A., Strelnikov P. (2022) Study of the Influence of the Grinding Wheel Composition Components on Its Performance During ID Grinding. In: Shamtsyan M., Pasetti M., Beskopylny A. (eds) Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Tech-

- nologies, vol 247. Springer, Singapore. pp 213-222 https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_23.
5. Рябцев С.А., Горин Н.А., Полканов Е.Г. Условия повышения технологичности изготовления высокопористых шлифовальных кругов на основе микросферного наполнителя. // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014.
6. Starkov V.K., Ryabtsev S.A., Polkanov E.G., Kiskin O.S. Comparative analysis of performance of cubic boron nitride and microcrystalline alumina tools in profile grinding of form cutters. Journal of Superhard Materials, 2014. Volume: 36. Issue: 1. Pages: 43-48.
7. Hessel D., Karyazin A., Starkov V.K., Ryabtsev S.A., Gorin N.A. High-efficiency rotary dressing method for cubic boron nitride wheels. Journal of Superhard Materials 2015. Т. 37. № 3. С. 194-201.
8. Шилай Л.П., Ящерицын П.И. Экспериментальные исследования высокоскоростного микрорезания по схеме внутреннего шлифования. – Абразивы, 1979, №10.
9. Филимонов Л.Н., Воронов С.Г. Опыт шлифования закаленных сталей со скоростью резания 35-120 м/сек. – Абразивы. М.: НИИМАШ, 1972, №3.

REFERENCES

1. Krivoruchko DV, Zaloga VA. Modeling of cutting processes by the finite element method: methodological foundations: monograph. Sumy: Universitetskaya Kniga; 2012.
2. Nepogozhev AA, Zheltukhin AV, Krit BL, Morozova NV, Epelfeld AV, Peretyagin PYu. Plasma-electrolyte coatings resistant to friction welding with stripping. Proceedings of the XI International Conference, 2018: Mechanical Engineering: Traditions and Innovations (MIT-2018); Moscow: MSTU "STANKIN"; 2018.
3. Romanenko AM, Shatko DB, Nepogozhev AA, Karavaev YaS. Abrasive machining of high-alloy corrosion resistant steels by example of 12X18H10T. Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation. 2021;3:98 – 106.

4. Romanenko AM, Shatko DB, Nepogozhev AA, Strelnikov P. Study of the influence of the grinding wheel composition components on its performance during ID grinding. In: Shamtsyan M, Pasetti M, Beskopylny A, editors. Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore. 2022. p. 213-222. Available from: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_23
5. Ryabtsev SA, Gorin NA, Polkanov EG. Conditions for increasing the manufacturability of highly porous grinding wheels based on microspheric filler. Vestnik MSTU "STANKIN". 2014.
6. Starkov VK, Ryabtsev SA, Polkanov EG, Kiskin OS. Comparative analysis of performance of cubic boron nitride and microcrystalline alumina tools in

- profile grinding of form cutters. *Journal of Superhard Materials*. 2014;36(1): 43-48.
7. Hessel D, Karyazin A, Starkov VK, Ryabtsev SA, Gorin NA. High-efficiency rotary dressing method for cubic boron nitride wheels. *Journal of Superhard Materials*. 2015;37(3):194-201.

Информация об авторах:

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельностью, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, заслуженный изобретатель РФ, заслуженный деятель науки Хабаровского края, член-корреспондент общественной академии проблем качества, член-корреспондент общественной инженерной

Mokritsky Boris Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, 914-175-7562, Chief Researcher of the Management of Research Activities, Professor of the Department of Mechanical Engineering at Komsomolsk-on-Amur State University, Honored Inventor of the Russian Federation, Honored Scientist of Khabarovsk Territory, Corresponding Member of the Public Academy of Quality Problems, Corresponding Member of the Public Engineering Academy,

8. Shilai LP, Yashcheritsyn PI. Experimental studies of high-speed micro-cutting according to the internal cutting scheme. *Abrasives*. 1979;10.
9. Filimonov LN, Voronov SG. Experience of grinding hardened steels with a cutting speed of 35-120 m/sec. *Abrasives*. Moscow: NIIMASH. 1972;3.

нерной академии, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>, boris@knastu.ru, тел. 914-175-7562.

Непогожев Андрей Александрович – начальник бюро режущего инструмента московского механического завода «Авангард», andrey.nepogozhev@gmail.com, тел. 977-729-0938.

Скрипилёв Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Skripilev.aal@email.knastu.ru, тел. 914-179-2859.

<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>, boris@knastu.ru, phone: 914-175-7562.

Nepogozhev Andrey Aleksandrovich – 977-729-0938, Head of the Cutting Tool Bureau of Moscow Mechanical Plant "Avangard", andrey.nepogozhev@gmail.com, phone: 977-729-0938.

Skripilyov Aleksandr Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Komsomolsk-on-Amur State University, Skripilev.aal@email.knastu.ru, phone: 914-179-2859.

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 08.10.2023; одобрена после рецензирования 23.10.2023; принята к публикации 27.10.2023. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 08.10.2023; approved after review on 23.10.2023; accepted for publication on 27.10.2023. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.