



Прогнозирование и примеры совершенствования абразивного инструмента для бесцентрового шлифования сталей

А.А. Непогожев¹, Б.Я. Мокрицкий^{2✉}, А.А. Скрипилёв³, В.Н. Аникин⁴, С.Б. Марьин⁵

¹АО «Московский машиностроительный завод «Авангард», г. Москва, Россия

^{2,3,5}Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

⁴Московский институт стали и сплавов, г. Москва, Россия

Резюме. Цель работы – повышение эффективности шлифования путем проектирования и выбора рациональных характеристик абразивного инструмента. Объектом исследования являются процессы и закономерности обеспечения безприжогового (бездефектного) шлифования деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемой коррозионностойкой нержавеющей стали марки 12X18H10T, никелевого сплава марки ХН60ВТ, конструкционной стали марки 30ХГСА и сложеннолегированной стали марки 12Х2НВФА. В работе использовано имитационное моделирование в программной среде DEFORM. В качестве критерия, регламентирующего обеспечение качественных показателей процесса шлифования, была выбрана температура в зоне резания. Исследования базируются на использовании положений теории резания материалов. Установлено, что каждый из исследованных абразивных инструментов 1 25А F60 O6V, 1 25А F60 Q6V, 1 25А F80 O6V, 1 25А F80 N7V имеет свою рациональную область применения. Для детали «Штырь» экономический эффект, достигнутый за счет исключения брака деталей, вызванного возникающими прижогами на шлифуемой поверхности, составил 18095 руб. С позиций повышения качества обработанной поверхности детали по шероховатости на основе анализа параметра Ra рационально применение малых глубин резания (от 0,05 мм до 0,25 мм) в сочетании с применением частот вращения ведущего круга до 108 мин⁻¹. С позиций обеспечения требуемой точности изготовления детали показано, что целесообразно применение глубин резания до 0,25 мм в сочетании с применением частоты вращения ведущего круга 86 мин⁻¹. Таким образом, разработаны новые концептуальные принципы и методология проектирования (и выбора) абразивных инструментов с обеспечением минимального разупрочнения материала шлифуемой детали, обеспечения требуемой шероховатости поверхности, точности размеров детали и производительности обработки. Дальнейшее развитие работы целесообразно вести с привлечением более крупнозернистых (F40, F36) абразивных инструментов.

Ключевые слова: абразивный режущий инструмент, бесцентровое шлифование, температурный параметр процесса шлифования

Для цитирования: Непогожев А.А., Мокрицкий Б.Я., Скрипилёв А.А., Аникин В.Н., Марьин С.Б. Прогнозирование и примеры совершенствования абразивного инструмента для бесцентрового шлифования сталей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 51–63. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-51-63>. EDN: JOHNB

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Forecasting and examples of abrasive tool improvement for centerless steel grinding

Andrey A. Nepogozhev¹, Boris Ya. Mokritskii^{2✉}, Aleksandr A. Skripilev³, Vyatcheslav N. Anikin⁴, Sergey B. Maryin⁵

¹JSC Moscow Machine-Building Plant "Avangard", Russia

^{2,3,5}Komsomolsk-na-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

⁴Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia

Abstract. The present work is aimed at enhancing the grinding efficiency of abrasive tools by designing and selecting their optimal characteristics. To that end, regularities in the process of defect-free grinding of workpieces made of hard-to-machine corrosion-resistant stainless steel of 12X18H10T grade, nickel alloy of XH60BT grade, structural steel of 30XGSA

grade, and complex-alloyed steel of 12X2HBF grade are studied by simulation modeling in the DEFORM software environment. The temperature in the cutting zone is selected as a criterion determining the quality indicators of the grinding process. The research methodology is based on the theory of metal cutting. It was established that each of the investigated abrasive tools, i.e., 1 25A F60 O6V, 1 25A F60 Q6V, 1 25A F80 O6V, and 1 25A F80 N7V is characterized by its rational field of application. For the "Pin" workpiece, the economic effect achieved due to elimination of scrap caused by grinding burns on the ground surface amounted to 18,095 RUB. In terms of the Ra parameter, an improved roughness of the machined surface can be achieved by small cutting depths (from 0.05 mm to 0.25 mm) in combination with a driving wheel speed of up to 108 min⁻¹. The required accuracy of machining can be achieved by cutting depths of up to 0.25 mm in combination with a driving wheel speed of 86 min⁻¹. Hence, a new methodology for designing and selection of abrasive tools is proposed. This methodology ensures minimal softening of the ground material, as well as the required surface roughness, accuracy of workpiece dimensions, and machining performance. In future research, coarser-grained (F40, F36) abrasive tools should be investigated.

Keywords: abrasive cutting tools, centerless grinding, grinding temperature parameter

For citation: Nepogozhev A.A., Mokritskii B.Ya., Skripilev A.A., Anikin V.N., Maryin S.B. Forecasting and examples of abrasive tool improvement for centerless steel grinding. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):00-00. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-51-63>. EDN: JOHNBj.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении растет востребованность в использовании труднообрабатываемой нержавеющей стали марки 12X18H10T из-за ее высокой коррозионной стойкости. Соответственно, возникает необходимость [1, 2] в высокопроизводительном шлифовании заготовок деталей, выполненных из этой стали.

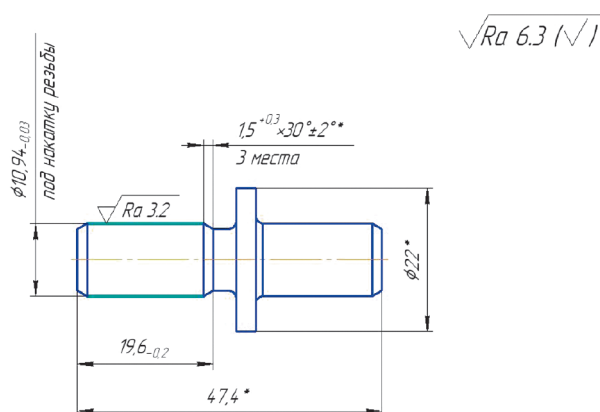
Вопросы совершенствования процесса шлифования рассмотрены подробно в работах [3–18] и в исследованиях других авторов. Достигнут прогресс в совершенствовании конструкций шлифовальных кругов, в оптимизации параметров шлифования, в применении смазывающе-охлаждающих технологических сред. Но это выполнено для типовых конструкционных материалов, для шлифования плоских поверхностей или тел вращения значительных размеров. Для бесцентрового шлифования заготовок деталей малого диаметра (3–10 мм) такие исследования отсутствуют.

Ниже рассмотрены особенности и результаты разработки и применения абразивного инструмента для бесцентрового шлифования заготовок детали «штырь», выполненной из этой стали. Деталь изготавливается в условиях АО «Московский машиностроительный завод «Авангард», входящий в состав АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей».

В работе обоснована необходимость и возможность проектирования и/или выбора абразивных инструментов для эффективного бесцентрового шлифования заготовок указанной детали без прижогов и с обеспечением требуемой точности и шероховатости обра-

ботки. Разработаны рекомендации по проектированию и выбору абразивного инструмента. Их применение позволило снизить трудоемкость проектирования (выбора) абразивного инструмента с 1,5 ч до 2 мин и уменьшить брак деталей до 0,1% по причине прижогов поверхности и погрешности полученных размеров детали.

Эскиз детали «штырь» показан на рис. 1.



*Размеры для справок

Рис. 1. Эскиз детали «штырь» [1] (обозначения сохранены так, как они указаны на чертеже детали, остальные сведения чертежа удалены)

Fig. 1. A sketch of the "pin" part [1] (indications are saved as they are given on the drawing of the part, the rest of the drawing legend is deleted)

После шлифования должен быть получен цилиндр диаметром 10,94_{-0,03}^{+0,03} под последующую накатку резьбы на этой поверхности.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходной концепции методологии исследования принято следующее:

1. Современные программные средства позволяют использовать разные программные среды для автоматизированного проектирования (и выбора) абразивного инструмента под заданные условия эксплуатации инструмента. Рассмотрена возможность использования программной среды DEFORM [19] под стоящие задачи исследования.

2. Необходимо выяснить критерии и параметры, с помощью которых можно использовать программную среду DEFORM для обеспечения высокоскоростного проектирования абразивного инструмента, обеспечивающего эффективное шлифование с обеспечением минимального разупрочнения материала шлифуемой детали, обеспечения требуемой шероховатости поверхности, точности размеров детали и производительности обработки.

3. Требуется выбрать параметры и критерии, с помощью которых можно осуществлять выбор наиболее рациональных абразивных инструментов и условий шлифования.

Если условно представить программную среду DEFORM как некий «черный ящик», то для получения необходимых указанных выше параметров и критериев эффективного шлифования как *выходных параметров среды*, необходимо ей задать соответствующие *входные параметры, ограничения и критерии*. Некоторое представление об этом дает рис. 2, где показана структурная модель такого проектирования рационального абразивного инструмента.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Один из примеров измерения температуры в зоне резания тепловизором модели Testo 890-1 приведен на рис. 3.

Анализ полученных результатов по средней температуре обрабатываемой поверхности показал, что наименьшая температура зафиксирована при шлифовании абразивным инструментом 25A F60 O6V. Она составляет 550–600°C (рис. 3 а). Максимальная температура (700 и более °C) зафиксирована при шлифовании абразивным инструментом 1 25A F80 O6V (рис. 3 с) и абразивным инструментом 25A F80 N7V (рис. 3 d). Абразивный инструмент 25A F60 Q6V показал промежуточные результаты (температура 650–700°C, рис. 3 b). Из этого следует, что применение абразивного инструмента 25A F80 N7V приво-

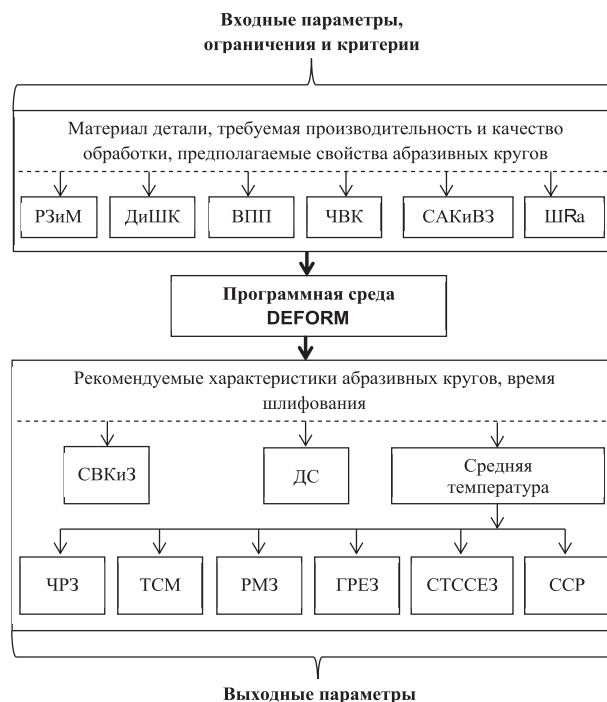


Рис. 2. Структурная модель проектирования абразивного металлорежущего инструмента путем имитационного моделирования в программной среде DEFORM (обозначения: P3иM – размеры заготовки детали и ее материал; ДиШК – диаметр и ширина шлифующего и ведущего абразивных кругов; ВПП – величина поперечной подачи; ЧВК – частота вращения абразивных кругов; САКиВЗ – связки абразивных кругов и вид их зерен; ШRa – требуемая шероховатость Ra шлифуемой поверхности детали; ЧРЗ – число одновременно работающих зерен шлифующего круга; ТСМ – толщина срезаемого металла заготовки детали; РМЗ – расстояние между единичными работающими зернами; ГРЕЗ – средняя глубина резания единичным зерном; СТССЕЗ – средняя толщина среза единичным зерном; ССР – суммарная сила резания; СВКиЗ – скорость вращения абразивного инструмента и заготовки детали; ДС – длина среза материала заготовки)

Fig. 2. Structural model for designing an abrasive metal-cutting tool using DEFORM simulation (indications: P3иM – workpiece dimensions and material; ДиШК – grinding and driving abrasive wheel diameter and width; ВПП – cross feed value; ЧВК – abrasive wheel rotation frequency; САКиВЗ – bonded abrasive wheels and their grain type; ШRa – required roughness Ra of the part ground surface; ЧРЗ – number of simultaneously operating grains of the grinding wheel; ТСМ – workpiece cut metal thickness; РМЗ – distance between single operating grains; ГРЕЗ – single grain average cutting depth; СТССЕЗ – single grain average cut thickness; ССР – total cutting force; СВКиЗ – abrasive tool and workpiece rotation speed; ДС – cutting length of the workpiece material)

Примечание: В тексте далее также использованы обозначения: РХАИ – рекомендуемая характеристика абразивного инструмента; ВПШ – основное время процесса шлифования.

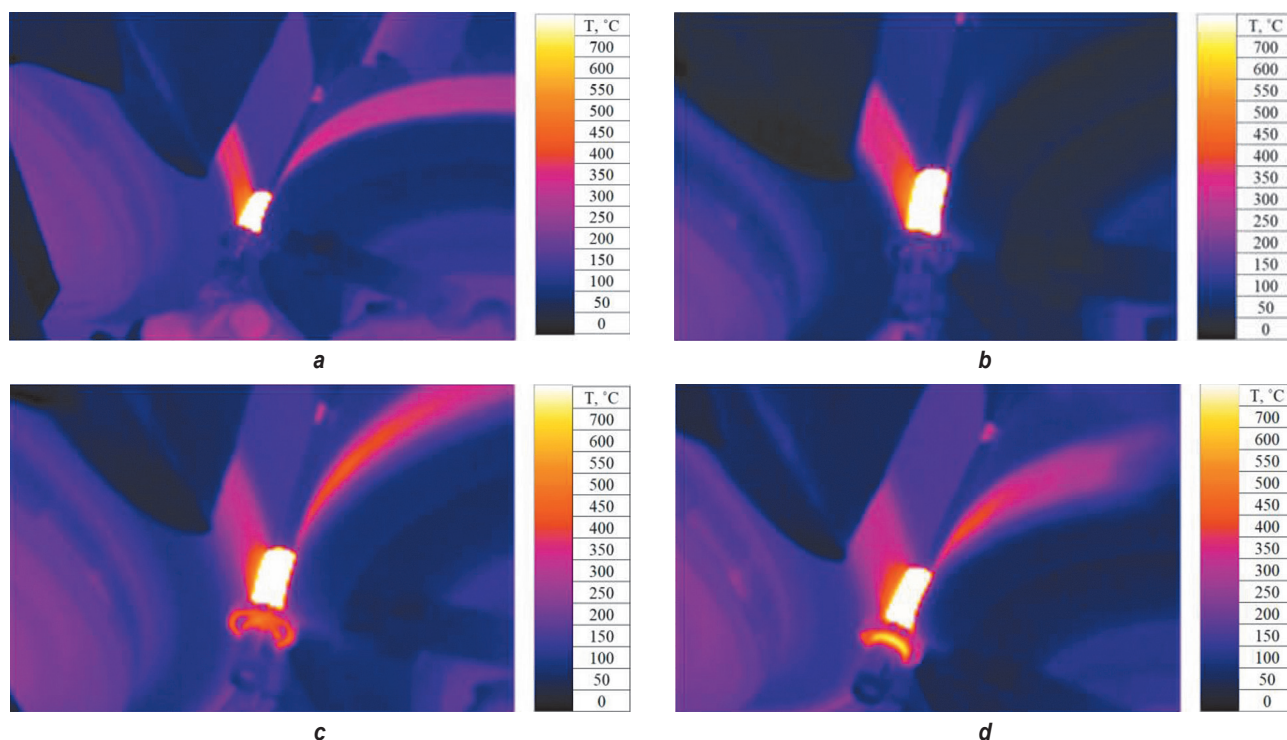


Рис. 3. Температурные картины зоны резания при шлифовании (число оборотов абразивного инструмента 1910 мин^{-1} , частота вращения ведущего круга 42 мин^{-1} , глубина резания $0,1 \text{ мм}$) разными абразивными инструментами: а – 25AF60O6V (зарегистрирована температура $550\text{--}600^\circ\text{C}$); б – 25AF60Q6V (зарегистрирована температура $650\text{--}700^\circ\text{C}$); в – 25AF80O6V (зарегистрирована температура 700 и более $^\circ\text{C}$); д – 25AF80 N7V (зарегистрирована температура 700 и более $^\circ\text{C}$). (Справа на рис. х показаны шкалы температур, светлое пятно в центре рисунков – температурный очаг в зоне резания, слева от очага виден контур ведущего круга, справа – контур абразивного инструмента (шлифование без применения смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС))

Fig. 3. Temperature pictures of the cutting zone under grinding (abrasive tool revolution number is 1910 min^{-1} , drive wheel rotation speed is 42 min^{-1} , cutting depth is 0.1 mm .) with different abrasive tools: а – 25AF60O6V (recorded temperature is $550\text{--}600^\circ\text{C}$); б – 25AF60Q6V (recorded temperature is $650\text{--}700^\circ\text{C}$); в – 25AF80O6V (recorded temperature is 700°C and higher); д – 25AF80 N7V (recorded temperatures is 700°C and higher). (The Fig. x (on the right) shows temperature scales, the light spot in the center is the temperature focus in the cutting zone, to the left of the focus there is the outline of the drive wheel, to the right there is the outline of the abrasive tool (grinding is free from lubricating-cooling technological medium)

дит к большему выделению тепла в зоне резания, чем при применении остальных абразивных инструментов.

Для достижения цели исследования выполнено измерение твердости и микротвер-

дости материалов, из которых выполнены детали.

Результаты оценки изменения твердости HRB материала до шлифования и после шлифования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты изменения твердости материала детали «штырь» после шлифования разными абразивными инструментами

Table 1. Results of "pin" part material hardness variation after grinding with different abrasive tools

Обозначение и характеристика абразивного инструмента	Значения твердости по Роквеллу, HRB		
	по чертежу	до шлифования	после шлифования
1 350x100x203 25A F80 O6V	34	32	30
1 350x100x203 25A F60 O6V	34	34	34
1 350x100x203 25A F60 Q6V	34	33	33
1 350x100x203 25A F80 N7V	34	34	31

Примечание. Жирным шрифтом выделены те абразивные инструменты, применение которых привело к существенному (2 и более единиц твердости HRB) снижению твердости материала детали после шлифования.

Полученные результаты показывают, что наибольшую твердость после шлифования обеспечивает абразивный инструмент 1 25А F60 O6V. В отношении абразивных инструментов, указанных в табл. 1 необходимо отметить следующее:

1. У всех инструментов одинаковый материал 25А. Это электрокорунд на керамической связке. Дальнейшие обозначения, приведенные в обозначении характеристик инструмента, указывают на их существенное различие, что и обеспечивает различие по температуре в зоне резания при шлифовании ими.

2. К примеру, обозначение и характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F60 O6V означает: цифра 1 указывает, что абразивный инструмент имеет прямой профиль; цифры 350х100х203 указывают следующие размеры: 350 – наружный диаметр в мм, 100 – ширина в мм, 203 – внутренний (посадочный) диаметр в мм; 25А – материал зерен, электрокорунд белый с характеристиками F60 O6V, где F60 – зернистость, средний размер основной фракции 250 мкм; О – твердость, среднетвердый; 6 – структура, средняя; V – связка керамическая.

3. Характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F80 O6V означает (далее указано только отличие от указанного выше обозначения): F80 – зернистость, средний размер основной фракции 160 мкм.

4. Характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F60 Q6V означает: Q – твердость, на 2 позиции тверже, чем в инструменте с твердостью О.

5. Характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F80 N7V означает: N – твердость, средняя; 7 – структура, средняя, более открытая по сравнению с 6.

Результаты исследования микротвердости HV (для проверки присутствуют ли прижоги на материале детали после шлифования) показаны на рис. 4.

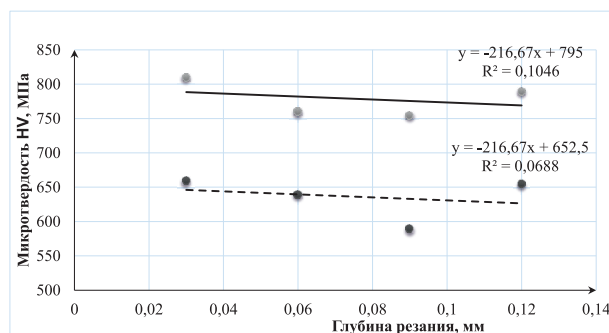


Рис. 4. Зависимость микротвердости HV от глубины шлифования t при применении разных абразивных инструментов: верхняя линия – абразивный инструмент 1 25А F60 O6V; нижняя линия – абразивный инструмент 1 25А F80 O6V

Fig. 4. Dependence of HV microhardness on t grinding depth when using different abrasive tools: top line – 1 25А F60 O6V abrasive tool; bottom line – 1 25А F80 O6V abrasive tool

Таблица 2. Таблица формул, описывающих влияние ряда параметров на качество обработки деталей, выполненных из разных материалов

Table 2. Table of formulas describing the influence of a number of parameters on the processing quality of parts made from different materials

Параметры	Формулы, описывающие зависимости, дисперсия			
	Деталь «Штырь», материал 12Х18Н10Т, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Валик», сплав ХН60ВТ, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Палец», материал 30ХГСА, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Шпилька», материал 12Х2НВФА, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	$HRB = -67,87 t + 36,957$ Дисперсия 0,9496	$HRB = -62,857 t + 37,857$ Дисперсия 0,9299	$HRB = -37,143 t + 47,0$ Дисперсия 0,9494	$HRB = -54,286 t + 35,0$ Дисперсия 0,9093
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от числа оборотов n ведущего круга	$HRB = -0,0982 n + 32,571$ Дисперсия 0,936	$HRB = -0,0983 n + 33,422$ Дисперсия 0,9662	$HRB = -0,09 n + 47,0$ Дисперсия 0,9511	$HRB = -0,1377 n + 35,66$ Дисперсия 0,9662
Зависимость микротвердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	Для 1 25А F80 O6V $HV = -3560,7 t + 4667,1$ Дисперсия 0,9496	$HV = -3328,6 t + 4594,3$ Дисперсия 0,9051	$HV = -1785,7 t + 4998,6$ Дисперсия 0,9812	$HV = -3428,6 t + 4828,6$ Дисперсия 0,963
	Для 1 25А F60 O6V $HV = -216,67 t + 795,0$ Дисперсия 0,9308	–	–	–

Анализ рис. 4 показывает, что разброс величин микротвердости HV значителен, но значения не выходят за пределы допустимых, т.е. шлифование не привело к образованию прижогов. Для абразивного инструмента 1 25A F80 O6V отмечена наименьшая микротвердость. Это свидетельствует о разупрочнении материала детали «штырь» в поверхностном слое. Подтверждением этому являются уравнения регрессии.

HV = f(t), приведенные в табл. 2, даны для всех рассматриваемых деталей.

На рис. 5 показана зависимость качества обработки заготовки детали «штырь» от глубины резания при шлифовании абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹). Качество обработки оценено по среднему арифметическому отклонению профиля Ra.

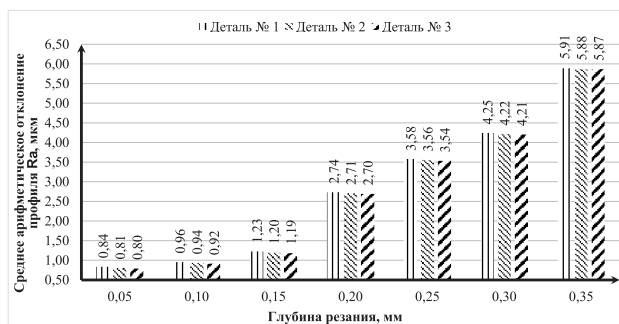


Рис. 5. Влияние глубины резания на параметр Ra шероховатости при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹)

Fig. 5. Influence of the cutting depth on Ra roughness parameter when grinding the workpiece of the “pin” part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (drive wheel rotation speed is 42 min⁻¹)

Из рис. 6 следует, что с ростом глубины резания от 0,05 до 0,35 мм шероховатость ухудшается с Ra 0,81 до Ra 5,88 мкм. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra свидетельствует о наличии зависимости параметра Ra от глубины резания. Следовательно, рационально применение малых глубин резания. Эти результаты существенно отличаются от результатов, указанных в работах [4–6]. Но полученные нами результаты подтверждены экспериментально.

На рис. 6 представлены аналогичные экспериментальные данные влияния частоты вращения ведущего круга на параметр Ra.

Из рис. 6 следует, что с ростом частоты вращения ведущего круга отклонение профи-

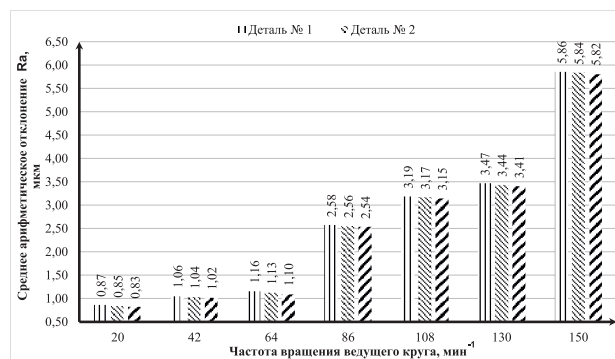


Рис. 6. Влияние частоты вращения ведущего круга на среднее арифметическое отклонение параметра Ra шероховатости при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (глубина резания 0,1 мм)

Fig. 6. Influence of the drive wheel rotation speed on the arithmetic mean deviation of Ra roughness parameter when grinding the workpiece of the “pin” part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (cutting depth is 0.1 mm)

ля Ra зависит существенно, а именно с изменением частоты вращения с 20 мин⁻¹ до 150 мин⁻¹ (диаметр круга 250 мм) параметр Ra возрастает от 0,83 до 5,84 мкм. Анализ среднего арифметического отклонения профиля Ra показывает, что рационально применение частот вращения до 108 мин⁻¹. Ограничение частоты вращения ведущего круга до 108 мин⁻¹ согласуется с результатами, приведенными в работах [7, 8].

Влияние параметров режима резания на качество обработки путем контроля размера детали и на стабильность этого размера показано на рис. 7 и 8.

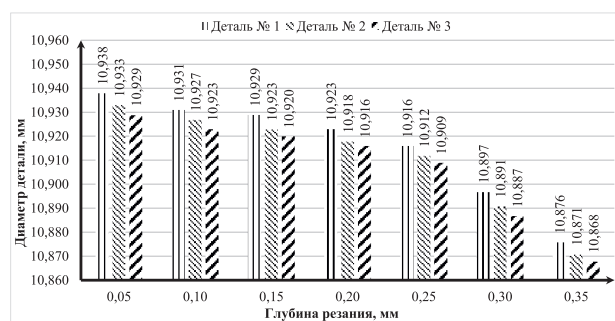


Рис. 7. Зависимость диаметра детали от глубины резания при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹)

Fig. 7. Dependence of the part diameter on the cutting depth when grinding the workpiece of the “pin” part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (drive wheel rotation speed is 42 min⁻¹)

Из рис. 7 следует, что среднеквадратичное отклонение размера фактически постоянное

(от 0,003 до 0,005 мм), изменение значимой цифры происходит в третьем знаке после запятой, а чертежом детали предусматривается возможность отклонения размера $10,94_{-0,03}$ во втором знаке $_{-0,03}$ после запятой. Вывод: это является основанием для того, чтобы считать, что требования чертежа удовлетворены и размер детали не зависит от глубины резания в этом диапазоне.

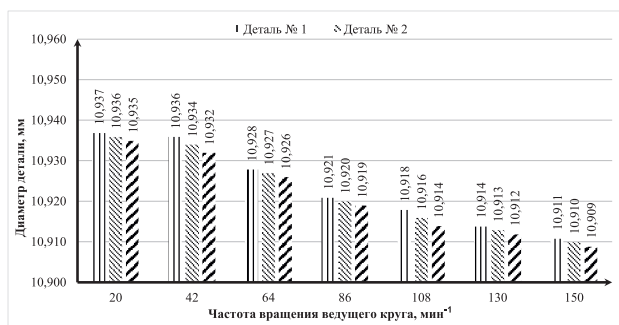


Рис. 8. Зависимость размера детали от частоты вращения ведущего круга при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (глубина резания 0,1 мм)

Fig. 8. Dependence of the part size on the drive wheel rotation speed when grinding the workpiece of the "pin" part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (cutting depth is 0.1 mm)

Из рис. 8 следует, что отклонение размера $10,94_{-0,03}$ зафиксировано в третьей цифре после запятой, а требованием чертежа детали допускается отклонение до второй цифры ($_{-0,03}$) после запятой, т.е. требования чертежа удовлетворены.

Важно было выявить возможности достижения минимальной температуры в зоне шлифования разных деталей. Для этого на рис. 9 показаны минимальные значения температуры в зоне резания при использовании абразивного инструмента 1 25A F60 O6V на примере деталей, выполненных из разных материалов.

Из рис. 9 следует, что изменение температуры при шлифовании заготовок деталей, выполненных из разных материалов, незначительно и происходит в диапазоне 550–570°C. Вывод: абразивный инструмент 1 25A F60 O6V в определенной мере универсален, он применим для любого из материалов рассмотренных деталей.

Вместе с тем аналогичные исследования по максимальным температурам в зоне шлифования показали, что их максимальные значения изменяются в диапазоне 750–810°C. Наименьшее значение максимальной тем-

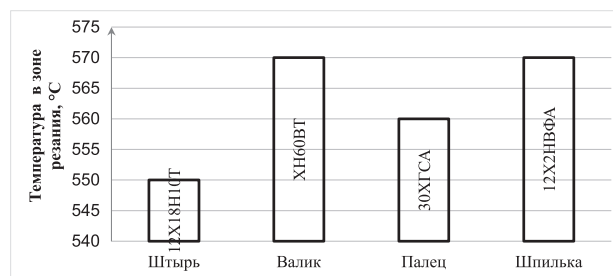


Рис. 9. Минимальные значения температуры в зоне резания при использовании абразивного инструмента 1 25A F60 O6V на примере деталей, выполненных из разных сталей (глубина резания 0,1 мм, частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹)
Fig. 9. Minimum temperature values in the cutting zone when using 1 25A F60 O6V abrasive tool for the case of the parts made from different steels (cutting depth is 0.1 mm, drive wheel rotation speed is 42 min⁻¹)

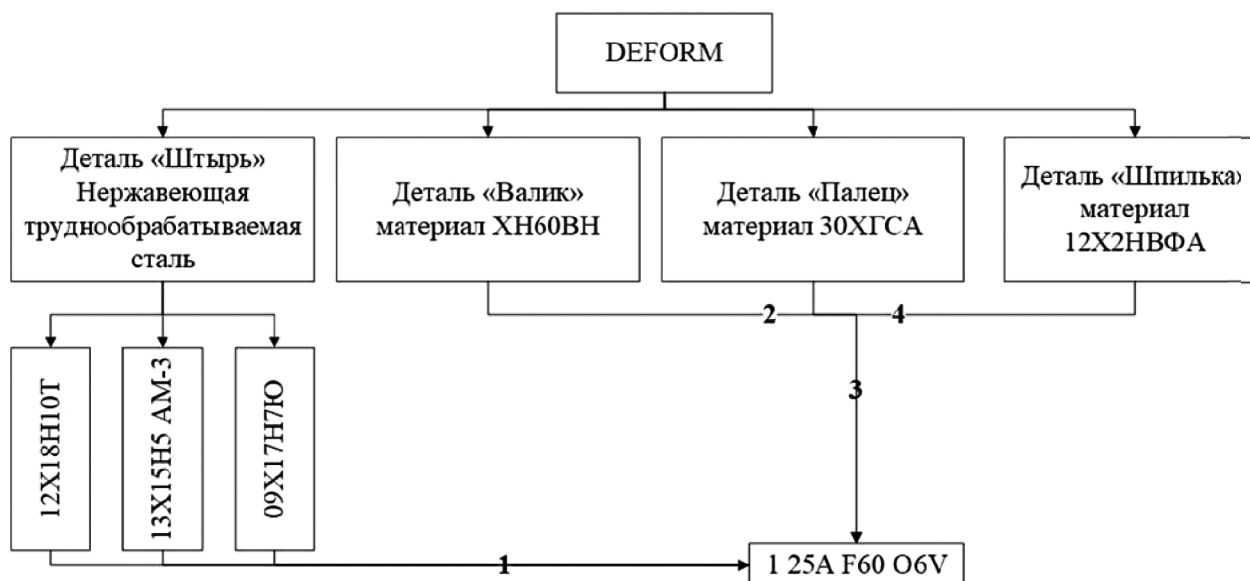
пературы выявлено для абразивного инструмента 1 25A F80 N7V при шлифовании детали «валик», выполненной из никелевого сплава марки XH60BT. Наибольшее значение температуры выявлено при шлифовании абразивным инструментом 1 25A F80 N7V детали «шпилька», выполненной из высоколегированной стали марки 12X2HBF. Вывод: одинаковый абразивный инструмент при обработке заготовок деталей, выполненных из разных материалов, приводит к совершенно разным максимальным температурам резания.

Иначе говоря, нет абсолютно плохого абразивного инструмента, но нет и абсолютно хорошего инструмента.

Важно было оценить необходимость и возможность проектирования новых абразивных инструментов для бесцентрового шлифования рассматриваемых деталей, имеющих разные диаметры (особенно для деталей с диаметром 3 мм) и марки материалов. Для этого было выполнено прогнозное моделирование в программной среде DEFORM.

На рис. 10 показана схема реализации принципа разработки универсального абразивного инструмента для всех рассмотренных случаев.

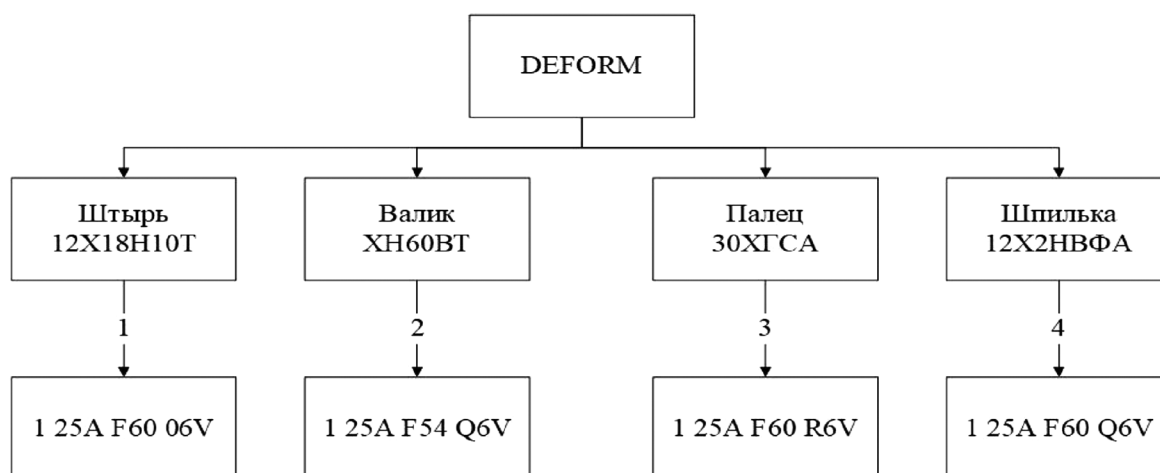
Под реализацией принципа разработки универсального абразивного инструмента для рассмотренных деталей здесь понимаются рекомендации, сформированные программной средой DEFORM по применению абразивных инструментов. Из рис. 10 следует, что универсального инструмента нет, но более всего для этих условий может быть применен абразивный инструмент 1 25A F60 O6V с ограничениями 1–4 (они указаны внутри рис. 10).



1. Не рекомендуется превышать глубину резания 0,25 мм и число оборотов ведущего круга 20 мин⁻¹.
2. Не рекомендуется число оборотов абразивного инструмента более 1000 мин⁻¹, т.е. требуется модернизация станка.
3. Не рекомендуется число оборотов абразивного инструмента более 1900 мин⁻¹, т.е. требуется модернизация станка.
4. Не рекомендуется глубина резания более 0,25 мм и число оборотов абразивного инструмента более 1900 мин⁻¹, т.е. требуется модернизация станка.

Рис. 10. Рекомендации программной среды DEFORM по реализации принципа разработки универсального абразивного инструмента для рассмотренных деталей

Fig. 10. Recommendations of the DEFORM software environment for implementing the principle of universal abrasive tool development for the considered parts



1. Рекомендуется глубина резания до 0,25 мм и число оборотов ведущего круга 20 мин⁻¹.
2. Рекомендовано увеличить число зерен (20 зерен на 1 мм²) на единицу площади абразивного инструмента.
3. Рекомендованы более твердые (до Р, на одну позицию тверже О) абразивные инструменты.
4. Рекомендовано увеличить число зерен (12 зерен на 1 мм²) на единицу площади абразивного инструмента.

Рис. 11. Рекомендации программной среды DEFORM по реализации принципа разработки персонального абразивного инструмента для рассмотренных деталей и материалов, из которых они изготовлены

Fig. 11. Recommendations of the DEFORM software environment for implementing the principle of personal abrasive tool development for the considered parts and materials they are made from

На рис. 11 показана схема реализации принципа разработки персонального абразивного инструмента для каждого из рассмотренных случаев.

Под реализацией здесь понимаются рекомендации, разработанные программной средой DEFORM, по применению абразивного инструмента для каждой из рассмотренных деталей и материалов, из которых они изготовлены, с учетом особенностей 1–4. Из рис. 11 следует, что создание персонального абразивного инструмента возможно. Методические посылы и технические возможности для этого имеются.

Необходимо отметить следующую выявленную особенность. Выше в табл. 1 указано несколько разных характеристик абразивных инструментов. Это те, которые удалось закупить и испытать.

Тем не менее известно, что для снижения температуры в зоне резания применяют большую зернистость. Проведенный анализ показывает, что изменение зернистости круга и, следовательно, изменение концентрации и количества источников тепла несущественно влияют на максимальные значения температур. Но увеличение зернистости приводит к уменьшению числа источников, что в среднем выравнивает эффект концентрации источников тепла. При уменьшении зернистости наблюдается обратная картина.

Для рассматриваемых нами деталей снижение температуры в зоне резания можно достичь применением абразивного инструмента с зернистостью F40. При такой зернистости на одном квадратном миллиметре поверхности инструмента среднее число зерен составляет 5,6. Для сравнения – при зернистости F80 среднее число зерен составляет 28. Это в 5 раз больше, чем у F40. Соответственно, это хуже с позиций снижения температуры.

Есть основания считать, что для шлифования рассматриваемых деталей зернистость F40 более рациональна как средство достижения «бесприжогового шлифования». Это позволяет создать запас по параметру шероховатости Ra (см. рис. 5).

В сводном виде результаты исследований для указанной выше детали «штырь» приведены в табл. 2. В этой же табл. для сравнения приведены результаты по бесцентровому шлифованию других деталей, производимых на АО «Московский машиностроительный

завод «Авангард», выполненных из иных материалов и имеющих значительно меньший диаметр.

Эти результаты новы и не противоречат представлениям, изложенным в работах [9–18, 20].

Сведения, приведенные в табл. 2, позволяют заключить следующее:

1. При оценке зависимости твердости HRB обработанной поверхности детали от глубины резания t выпадают из закономерности два случая:

а) обработка детали «палец» (типовая конструкционная сталь марки 30ХГСА) характеризуется зависимостью $HRB = -37,143 t + 47,0$;

б) обработка детали «шпилька» (специализированная высоколегированная конструкционная сталь марки 12Х2НВФА) характеризуется зависимостью $HRB = -54,286 t + 35,0$.

Именно эти детали имеют очень маленький диаметр (3 мм) из всех рассмотренных в работе деталей. Пока нет возможности связать это выпадение из закономерности именно с малым диаметром деталей или с особенностями материалов, из которых они выполнены, но такой факт выявлен.

2. При оценке зависимости твердости HRB обработанной поверхности детали от числа оборотов n ведущего круга выпадает из закономерности случай обработки детали «Шпилька» (материал 12Х2НВФА). Эта зависимость описывается уравнением $HRB = -0,1377 n + 35,66$.

3. При оценке зависимости микротвердости HV обработанной поверхности детали от глубины резания t выпадают из закономерности три случая:

а) обработка детали «валик» (никелевый сплав ХН60ВТ) характеризуется зависимостью $HV = -3328,6 t + 4594,3$;

б) обработка детали «палец» (типовая конструкционная сталь марки 30ХГСА) характеризуется зависимостью $HV = -1785,7 t + 4998,6$;

в) обработка детали «штырь» (труднообрабатываемая нержавеющей сталь марки 12Х18Н10Т) характеризуется зависимостью $HV = -216,67 t + 795,0$.

4. С ростом глубины резания t усиливается разупрочнение шлифуемой поверхности заготовки детали. Это следует из регрессионных зависимостей, указанных в табл. 2, поскольку

Таблица 2. Таблица формул, описывающих влияние ряда параметров на качество обработки деталей, выполненных из разных материалов

Table 2. Table of formulas describing the influence of a number of parameters on the processing quality of parts made from different materials

Параметры	Формулы, описывающие зависимости, дисперсия			
	Деталь «Штырь», материал 12Х18Н10Т, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Валик», сплав ХН60ВТ, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Палец», материал 30ХГСА, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Шпилька», материал 12Х2НВФА, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	$HRB = -67,87 t + 36,957$ Дисперсия 0,9496	$HRB = -62,857 t + 37,857$ Дисперсия 0,9299	$HRB = -37,143 t + 47,0$ Дисперсия 0,9494	$HRB = -54,286 t + 35,0$ Дисперсия 0,9093
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от числа оборотов n ведущего круга	$HRB = -0,0982 n + 32,571$ Дисперсия 0,936	$HRB = -0,0983 n + 33,422$ Дисперсия 0,9662	$HRB = -0,09 n + 47,0$ Дисперсия 0,9511	$HRB = -0,1377 n + 35,66$ Дисперсия 0,9662
Зависимость микротвердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	Для 1 25А F80 O6V $HV = -3560,7 t + 4667,1$ Дисперсия 0,9496 Для 1 25А F60 O6V $HV = -216,67 t + 795,0$ Дисперсия 0,9308	$HV = -3328,6 t + 4594,3$ Дисперсия 0,9051	$HV = -1785,7 t + 4998,6$ Дисперсия 0,9812	$HV = -3428,6 t + 4828,6$ Дисперсия 0,963

в зависимостях при значениях глубин резания t и частоты оборотов n ведущего круга стоит знак «минус», например, $HRB = -67,87 t + 36,957$ или $HV = -3560,7 t + 4667,1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен комплекс новых научно обоснованных технических решений, направленных на совершенствование проектирования и выбора абразивного инструмента, позволяющих повысить эффективность бесцентрового шлифования. Разработанные технические решения созданы с позиций исключения прижогов шлифуемой заготовки деталей, обеспечения требуемого качества обработанной поверхности (по точности размеров детали и шероховатости обработанной детали). Экономический эффект рассчитан применительно к условной программе 1000 шт. деталей. Соответственно к деталям «штырь», «валик», «палец» и «шпилька» условный экономический эффект составил 18095 руб., 6956 руб., 9863 руб. и 5442 руб. Эффект достигнут за счет исключения брака деталей по причине прижога шлифуемой поверхности деталей.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В качестве критерия совершенствования бесцентрового шлифования предложено использовать минимальную температуру в зоне резания. Под этот критерий разработана новая методология проектирования и выбора абразивных режущих инструментов. Разработаны алгоритмы такого проектирования абразивных инструментов для разных условий шлифования, разработаны программы проектирования характеристик абразивных инструментов. Такое проектирование выполнено с использованием имитационного моделирования, результаты моделирования подтверждены экспериментально. Применение данного критерия обеспечивает исключение прижогов шлифуемой заготовки деталей, обеспечивает требуемые точность размеров детали и шероховатость обработанной детали.

2. Возможность создания нового абразивного инструмента под каждые из рассмотренных условий обработки спрогнозирована имитационным моделированием в программной среде DEFORM.

3. Установлены зависимости выходных параметров процесса шлифования от технологических настроечных значений процесса, а именно:

а) с позиций повышения качества обработанной поверхности детали по шероховатости на основе анализа параметра R_a рационально применение малых глубин резания (от 0,05 мм до 0,25 мм) в сочетании с применением частот вращения ведущего круга до 108 мин⁻¹;

б) с позиций обеспечения требуемой точности изготовления детали установлено, что целесообразно применение глубин резания

до 0,25 мм в сочетании с применением частоты вращения ведущего круга 86 мин⁻¹.

4. С ростом глубины резания t усиливается разупрочнение шлифуемой поверхности заготовки детали. Это следует из регрессионных зависимостей, указанных в табл. 2, поскольку в зависимостях при значениях глубин резания t и частоты оборотов n ведущего круга стоит знак «минус», например, $HRB = -67,87 t + 36,957$ или $HV = -3560,7 t + 4667,1$.

5. Развитие работы целесообразно вести с привлечением более крупнозернистых (F40, F36) абразивных инструментов.

Список источников

1. 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 // *Машиностроение: традиции и инновации* (МТИ – 2018): материалы XI Междунар. конф. (г. Москва, 26 июня 2018 г.). М.: МГТУ «СТАНКИН», 2018. 91 с.
2. Романенко А.М., Шатко Д.Б., Непогожев А.А., Караваев Я.С. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионностойких сталей на примере 12X18H10T // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2021. № 3. С. 98–106. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106>.
3. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 354 с.
4. Эльянов В.Д. Шлифование в автоматическом цикле. М.: Машиностроение, 1980. 56 с.
5. Ящерицын П.И., Караим И.П. Скоростное внутреннее шлифование деталей подшипников // *Прогрессивные технологические процессы в механосборочном производстве, направленные на повышение производительности труда и качества изделий: сб. статей. Л.: Машиностроение, 1977. 282 с.*
6. 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. Vol. 37. Iss. 3. P. 194–201. <https://doi.org/10.3103/S1063457615030077>.
7. Вознесенский В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 144 с.
8. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Саратовский ун-т, 1978. 128 с.
9. Ozel T., Altan N. Determination of workpiece from stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6).
10. Espinosa C. Modeling high speed machining the SPH method // *X International LS-DYNA Users Conference* (Dearborn, Michigan, 8–10 June 2008). Dearborn, Michigan, 2008. P. 1-1–1-12.
11. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48. Iss. 1. P. 1–29. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2).
12. Okumiyama M., Gripenberg M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings // *Surface and Coating Technologies*. 1999. Vol. 112. P. 123–128. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00799-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00799-3).
13. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology // *CIRP Annals*. 2003. Vol. 52. Iss. 2. P. 483–507. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5).
14. Ducros C., Benevent V., Savchett F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 163. Iss. 2. P. 681–688. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00656-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00656-4).
15. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallization and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coatings // *Thin Solid Films*. 2003. Vol. 440. Iss. 1-2. P. 174–179. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00858-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00858-7).
16. Music D., Schneider I.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti₃Al // *Physical Review*. 2006. Vol. 74. Iss. 17. P. 174110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.174110>.
17. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory // *Computer Physics Communications*. 1998. Vol. 119. P. 67–11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9807418>.
18. Patent no. 99/131280, Great Britain. Method of making ultrafine WC-CO alloys / A.B. Sandvik, no. PST/SE98/01573. Filed 04.09.98; publ. 18.03.99.
19. Криворучко Д.В., Залогов В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
20. Рябцев С.А., Полканов Е.Г. Динамика стабильности свойств керамических композиций на основе электрокорунда с увеличением их структурности // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2014. № 6. С. 25–28.

References

1. Nepogozhev A.A., Zheltuhin A.V., Krit B.L., Morozova N.V., Epel'fel'd A.V., Peretyagin P.Yu. Plasma-electrolyte coatings resistant to friction stir welding. In: *Mashinostroenie: tradicii i innovacii (MTI – 2018): materialy XI Mezhdunarodnoj konferencii = Mechanical engineering: traditions and innovations (MIT - 2018): materials of the 11th International conference*. Moscow: Moscow State University of Technology "Stankin"; 2018, 91 p. (In Russ.).
2. Romanenko A.M., Shatko D.B., Nepogozhev A.A., Karavaev Ya.S. Abrasive machining of high-alloy corrosion resistant steels by example of 12Kh18N10T. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antej" = Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation*. 2021;(3):98-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106>.
3. Starkov V.K. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 354 p. (In Russ.).
4. Elyanov V.D. *Automatic cycle grinding*. Moscow: Mashinostroenie; 1980, 56 p. (In Russ.).
5. Yashchericyn P.I., Karaim I.P. High-speed internal grinding of bearing parts. In: *Progressivnye tekhnologicheskie processy v mekhanosbornochnom proizvodstve, napravlennye na povysenie proizvoditel'nosti truda i kachestva izdelij: sbornik statej = Progressive technological processes in mechanical assembly production to increase labor efficiency and product quality: collection of articles*. Leningrad: Mashinostroenie; 1977, 282 p. (In Russ.).
6. 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;37(3):194-201. <https://doi.org/10.3103/S1063457615030077>.
7. Voznesensky V.A. *Modern methods for composite material optimization*. Kyiv: Naukova Dumka; 1988, 144 p. (In Russ.).
8. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Physical foundations of the grinding process*. Saratov: Saratov State University; 1978, 128 p. (In Russ.).
9. Ozel T., Altan N. Determination of workpiece from stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000;40(1):133-152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6).
10. Espinosa C. Modeling high speed machining the SPH method. In: *X International LS-DYNA Users Conference*. 8–10 June 2008, Dearborn, Michigan. Dearborn, Michigan; 2008, p. 1-1–1-12.
11. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*. 2000;48(1):1-29. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2).
12. Okumiya M., Gripenrog M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings. *Surface and Coating Technologies*. 1999;112:123-128. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00799-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00799-3).
13. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology. *CIRP Annals*. 2003;52(2):483-507. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5).
14. Ducros C., Benevent V., Savchette F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*. 2003;163(2):681-688. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00656-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00656-4).
15. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallization and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coatings. *Thin Solid Films*. 2003;440(1-2):174-179. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00858-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00858-7).
16. Music D., Schneider I.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti₃Al. *Physical Review*. 2006;B 74:174110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.174110>.
17. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory. *Computer Physics Communications*. 1998;119:67-11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9807418>.
18. Sendvik A.B. *Method of making ultrafine WC-CO alloys*. Patent GB, no. 99/131280; 1999.
19. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. *Cutting process modeling using the finite element method: methodological foundations: monograph*. Sumy: Universitetskaya kniga; 2012, 496 p. (In Russ.).
20. Ryabtsev S.A., Polkanov E.G. Stability properties dynamics of ceramic composites based on aluminium oxide with structure increasing. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2014;6:25-28. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Непогожев Андрей Александрович,
начальник бюро режущего инструмента,
АО «Московский машиностроительный завод «Авангард»,
125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 33, корп. 35, Россия
andrey.nepogozhev@gmail.com

Мокрицкий Борис Яковлевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Машиностроение»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
✉ boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Nepogozhev,
Head of the Cutting Tools Bureau,
JSC Moscow Machine-Building Plant "Avangard",
33 Klara Zetkin St., bldg. 35, Moscow 125130, Russia
andrey.nepogozhev@gmail.com

Boris Ya. Mokritskii,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
✉ boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

Скрипилёв Александр Александрович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
Skripilev.aal@email.knastu.ru

Аникин Вячеслав Николаевич,
к.т.н.,
доцент кафедры функциональных наносистем
и высокотемпературных материалов,
заведующий Научно-технического центра,
Всероссийский научно-исследовательский
и проектный институт твердых сплавов и
тугоплавких металлов,
Московский институт стали и сплавов,
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, Россия
anikin47_47@mail.ru

Марьин Сергей Борисович,
д.т.н., доцент,
заведующий кафедрой «Авиационное»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
maryinsb@mail.ru

Aleksandr A. Skripilev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Engineering Technology
Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
Skripilev.aal@email.knastu.ru

Vyatcheslav N. Anikin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Functional
Nanosystems
and High Temperature Materials,
Head of the Scientific and Technical Center at the
All-Russian Research and Design Institute of Hard Alloys and
Refractory Metals,
Moscow Institute of Steel and Alloys,
4 Leninsky pr., Moscow 119049, Russia
anikin47_47@mail.ru

Sergey B. Maryin,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Aviation Engineering Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
maryinsb@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.12.2023 г.; принята к публикации 25.12.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 10.12.2023; accepted for publication 25.12.2023.