

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №11 (161). С.41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №11 (161). P.41-48.

Научная статья
УДК 621.952.45.001.5
doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Эффективные способы заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов

Виктор Иванович Бутенко¹, д.т.н.
Валерий Александрович Лебедев², к.т.н.
Елена Николаевна Колганова³, к.т.н.
Роман Геннадьевич Кадач⁴, аспирант

^{1, 2, 3, 4} Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ butenkowiktor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9260-1030>

² va.lebidev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

³ elenkolg@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9466-9658>

⁴ rkad925@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены проблемы повышения эффективности заточной операции металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов. В качестве металлорежущих инструментов рассматривались резцы с пластинами твёрдых сплавов, а также свёрла из быстрорежущей стали. В работе исследовались различные способы заточки металлорежущих инструментов, на предмет повышения стойкости затачиваемого инструмента, а также стабильность сохранения стойкости, после переточек. Также было исследовано влияние различных способов заточки на различные показатели качества, такие как шероховатость поверхности, микротвёрдость и величину внутрикристаллических напряжений в материале. Исследования по определению периода стойкости токарных твердосплавных пластин производились при точении бесступенчатых валиков из хромоникелевого сплава, а свёрл из быстрорежущей стали, при сверлении отверстий в котельной стали. По результатам исследований видно, что данные методы способны существенно увеличить период стойкости затачиваемых инструментов. Также рассмотрены варианты совмещения различных способов их заточки с другими путями уменьшения их износа. Результаты показали, что данные комбинированные методы позволяют повысить стойкость инструментов ещё на 15...20 %. Таким образом, по результатам выполненных исследований научноёмких способов заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов можно сделать вывод о высокой эффективности способа заточки, который заключается в применении импрегнированного диодидом хрома заточного абразивного круга с подачей в зону обработки йодосодержащей охлаждающей жидкости. Было установлено, что при использовании данного метода заточки, более высокий показатель стойкости достигается у двухкомпонентных твердосплавных пластин токарных резцов, относительно однокомпонентных твердосплавных пластин.

Ключевые слова: способ заточки, резец, сверло, стойкость, твёрдый сплав, быстрорежущая сталь, диодид хрома

Для цитирования: Бутенко В.И., Лебедев В.А., Колганова Е.Н., Кадач Р.Г. Эффективные способы заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 11 (161). С. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Effective ways of sharpening metal-cutting tools made of rapid steel and hard alloys

Viktor I. Butenko¹, D. Eng.
Valery A. Lebedev², Ph.D. Eng.
Elena N. Kolganova³, Ph.D. Eng.
Roman G. Kadach⁴, PhD student

^{1, 2, 3, 4} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ butenkoviktor@yandex.ru

² va.lebedev@yandex.ru

³ elenkolg@list.ru

⁴ rkad925@mail.ru

Abstract. The problems of increasing the efficiency of the sharpening operation of metal-cutting tools made of rapid steel and sintered-hard alloys are viewed. Cutters with sintered-hard alloy plates, as well as high-speed steel drills, have been on the tapis as metal-cutting tools. The paper examines various methods of sharpening metal-cutting tools for increasing their durability, as well as stable durability maintaining after regrinding. The influence of various sharpening methods on various merit rates, such as surface roughness, microhardness and the amount of transcrystalline stresses in the material, has been studied as well. Research for the durability period determination in turning carbide plates were carried out under turning process of stepless rollers made of chromium-nickel alloy, and drills made of rapid steel, when drilling holes in boiler steel. According to the research results, it can be seen that these methods can significantly increase the durability period of the sharpened tools. Research for the durability period determination in turning carbide plates were carried out under turning process of stepless rollers made of chromium-nickel alloy, and drills made of rapid steel, when drilling holes in boiler steel. According to the research results, it can be seen that these methods can significantly increase the durability period of the sharpened tools. The results showed that these combined methods can increase the durability of tools by another 15...20 %. Thus, taking into account the results of the performed studies using high-tech methods for sharpening metal-cutting tools made of rapid steel and sintered-hard alloys, it can be concluded that the sharpening method is highly effective, being based on the use of grinding abrasive wheel, which is chromium-impregnated and while supplying of an iodine-containing liquid coolant to the work zone. It was found that when using this sharpening method, a higher resistance index is achieved in two-component carbide plates of turning cutters, if comparing to single-component carbide plates.

Keywords: sharpening method, cutter, drill bit, durability, sintered-hard alloy, rapid steel, chromium diiodide

For citation: Butenko V.I., Lebedev V.A., Kolganova E.N., Kadach R.G. Effective ways of sharpening metal-cutting tools made of rapid steel and hard alloys / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 11 (161). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Введение

В современном машиностроительном производстве при выполнении токарных фрезерных и строгальных работ в качестве режущих элементов инструментов используют перетачиваемые пластины из твёрдого сплава разной формы. Обладая рядом преимуществ (универсальность, быстрота переналадки, большой сортамент насадок, быстрота переналадки), перетачиваемые пластины имеют ряд существенных недостатков (относительно большие габариты режущей части, не достаточная жёсткость крепления пластин, большая их номенклатура, износ отверстия под крепёж пластин и т. д.), которые сдерживают использование их на любых металлорежущих инструментах и при выполнении различных технологических операций. При этом следует отметить, что большинство инструментов для выполнения сверлильных операций, а

также цилиндрические, дисковые и концевые фрезы изготавливаются из разных марок быстрорежущей стали или с напаянными пластинами из твёрдого сплава и в процессе эксплуатации подвергаются многократной переточке. Поэтому разработка способов повышения эффективности заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов имеет актуальное значение в машиностроительном производстве, в том числе повышения эффективности эксплуатации станков в роботизированном производстве [1 – 3].

Известно, что состояние рабочих поверхностей инструментов, сформированное в процессе их заточки, оказывает существенное влияние как на стойкость инструментов, так и физические явления, происходящие в зоне резания [4, 5]. Однако в производственной и исследовательской практике вопросам совершенствования способов заточки металлорежущих

инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов уделяется не достаточное внимание.

Методика проведения исследований

Сравнительные исследования разработанных способов заточки проводились на токарных резцах с механическим креплением пластин из твёрдых сплавов ВК8, Т15К6, Т14К8 и спиральных свёрлах из быстрорежущей стали Р6М5. Заточка инструментов осуществлялась на универсальном заточном станке мод. ЗА64М с использованием специальных трёх координатных поворотных тисков при заточке твёрдосплавных пластин для токарных резцов и поворотного устройства для заточки свёрл по методу Уошборна [6].

Исследования по определению эффективности способов заточки инструментов проводились на токарном станке мод. 16А20 с ЧПУ и вертикально-сверлильном станке мод. 2Н135 с автономной подачей смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС). Токарной обработке подвергались бесступенчатые валики из сплава 45Х25Н20С2А диаметром 30 мм и длиной 250 мм на следующих режимах резания: скорость резания $v = 0,67$ м/с ($n = 400$ об/мин); подача $S = 0,2$ мм/об; глубина резания $t = 3,0$ мм, без охлаждения. Использовались резцы с механическим креплением режущих пластин из твёрдого сплава Т14К8 с размерами $B \times L \times H = 12 \times 18 \times 6$ мм, имеющие следующую геометрию заточки: $\alpha = 12^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 30^\circ$; $\varphi_1 = 45^\circ$; $r = 0,2$ мм. Износ пластин измерялся на микроскопе БМИ-1. При определении стойкости резца за критерий износа принимался износ режущей пластины по передней поверхности, равный $h_n = 1,2$ мм.

Сверление глухих отверстий на глубину 30 мм осуществлялось в брусках из котельной стали 12ХМФ с размерами $B \times H \times L = 100 \times 50 \times 200$ мм свёрлами из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 14 мм. За критерий износа был принят износ по задней поверхности сверла на периферийном участке, равный $h_z = 0,8$ мм, который фиксировался на микроскопе БМИ-1 с использованием специальной подставки [6]. При сверлении отверстий были приняты следующие режимы: скорость резания $v = 0,29$ м/с ($n = 400$ об/мин), подача $S = 0,15$ мм/об. В качестве СОТС использовался пятипроцентный водный раствор эмульсола «Укринол-14».

Стойкость резцов и свёрл определялась после следующих способов их заточки:

– заточка свёрл абразивным чашечным кругом типа 11 с характеристикой 175×20×32×3 25А

100L8 V 35 ГОСТ Р 52781-2007 ($v_{кр} = 13,2$ м/с; $S_{пр} = 0,06$ мм/дв.ход; $S_{поп} = 0,02$ мм/дв.ход) без охлаждения;

– заточка твёрдосплавных режущих пластин алмазным кругом типа 11 с характеристикой 175-13-32 АС6 100/80 М1 ($v_{кр} = 26,1$ м/с; $S_{пр} = 0,04$ мм/дв.ход; $S_{поп} = 0,02$ мм/дв.ход) без охлаждения;

– двойная заточка задней поверхности сверла с углами $2\varphi_1 = 118^\circ$ и $2\varphi_2 = 70^\circ$ без охлаждения;

– электроалмазная заточка свёрл и пластин из твёрдого сплава с использованием электролита состава нитрат калия – 5 %; нитрат натрия – 0,3 %; вода – 94,7% и следующих режимов: $v_{кр} = 26,1$ м/с; $S_{пр} = 0,06$ мм/дв.ход; $S_{поп} = 0,05$ мм/дв.ход стола станка, рабочее напряжение $U = 6$ В, плотность тока $i = 60 \dots 80$ А/см², расход электролита $v = 7$ л/мин [7];

– заточка свёрл абразивным кругом, импрегнированным диоксидом хрома CrJ₂ по технологии, описанной в работе [8, 9];

– заточка твёрдосплавных пластин алмазным кругом с охлаждением водным раствором, содержащим 3,6 г/л CrJ₂ и 42 г/л сульфата железа Fe₃O₄ [9];

– заточка твёрдосплавных режущих пластин и свёрл алмазным или абразивным кругом соответственно с подачей в зону обработки охлаждённо-ионизированного воздуха (ОИВ) при давлении 2,2 бар и температуре 5 °С;

В исследованиях определялась средняя стойкость инструментов по данным пяти последовательно проведённым испытаниям.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты выполненных исследований приведены в табл. 1, из анализа которых следует, что используемые в настоящее время в металлообработке способы повышения стойкости металлорежущих инструментов позволяют реально увеличить стойкость твёрдосплавных режущих пластин резцов в 1,3 раза и свёрл из быстрорежущей стали почти в 1,5 раза при токарной обработке деталей из хромоникелевого сплава и сверления отверстий в котельной стали. Однако затраты на практическое использование рассмотренных способов повышения стойкости металлорежущих инструментов существенно отличаются друг от друга. Поэтому выбор конкретных способов повышения стойкости металлорежущего инструмента и их практическое использование зависит от производственных условий предприятия. В связи с этим возникает необходимость в проведении дополнительных

исследований по определению эффективности принимаемого способа повышения стойкости металлорежущих инструментов, например, в

зависимости от количества обрабатываемых деталей с определением точки безубыточности [10].

1. Средние значения стойкости резцов и свёрл в зависимости от способа их заточки

1. Average values of resistance of cutters and drills depending on the method of their sharpening

Способ заточки инструмента	Стойкость инструмента <i>T</i> , мин	
	резец	сверло
Абразивным кругом без охлаждения	-	24,6
Алмазным кругом без охлаждения	37,5	27,9
Двойная заточка задней поверхности сверла	-	29,2
Электроалмазная заточка	44,6	32,7
Импregnированным CrJ ₂ абразивным кругом без охлаждения	-	34,6
Алмазным кругом с охлаждением водным раствором CrJ ₂ + Fe ₂ O ₃	48,2	-
Абразивным или абразивным кругом с подачей ОИВ	43,3	31,9

Повысить стойкость металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов можно за счёт совмещения способов их заточки с другими путями уменьшения их износа. Были проведены исследования следующих совмещённых способов повышения стойкости инструментов: 1 – заточка импregnированным диоксидом хрома абразивным кругом, совмещённая с подачей в зону резания йодосодержащего СОТС; 2 – заточка импregnированным диоксидом хрома абразивным кругом, совмещённая с подачей в зону резания ОИВ; 3 – йодосодержащее никель-фосфорное покрытие, совмещённое с подачей в зону резания йодосодержащего СОТС; 4 – нитрид титановое покрытие, совмещённое с подачей в зону резания йодосодержащего СОТС; 5 – заточка алмазным кругом с охлаждением водным раствором диоксида хрома и сульфата железа, совмещённая с подачей в зону резания йодосодержащего СОТС; 6 – заточка алмазным кругом с охлаждением водным раствором диоксида хрома и сульфата железа, совмещённая с подачей в зону резания ОИВ.

Результаты исследований в виде гистограмм приведены на рис. 1, из анализа которого следует, что применение совмещение способов заточки с другими путями уменьшения износа инструмента позволяет ещё на 15...20 % повысить стойкости инструментов по сравнению с их значениями, приведёнными в табл. 1. Однако в случае применения совмещённых способ повышения стойкости металлорежущих инструментов необходимо

учитывать их технологическую совместимость, особенно при нанесении на режущую часть инструментов покрытий или функциональных слоёв [11].

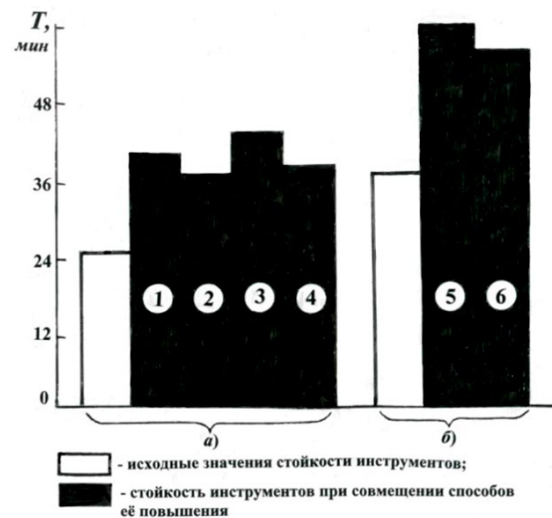


Рис. 1. Гистограмма стойкости свёрл из быстрорежущей стали Р6М5 (а) и режущих пластин из твёрдого сплава Т14К8 (б) от применения совмещённых способов повышения стойкости инструментов

Fig. 1. Histogram of resistance of drills made of rapid steel R6M5 (a) and cutting plates made of hard alloy T14K8 (b) from the use of combined methods to increase the resistance of tools

Эффективность способа заточки инструмента во многом зависит от физико-механических свойств инструментального материала. На рис. 2 представлена гистограмма стойкости режущих пластин из различных твёрдых

сплавов, построение которой осуществлялось по данным среднеарифметических значений стойкостей, полученных при токарной обработке 10 образцов из сплава 45Х25Н20С2А при одном и том же способе заточки пластин. Анализ гистограммы свидетельствует о том, что алмазная заточка твёрдосплавных режущих пластин с охлаждением зоны обработки водным раствором сульфата железа и диоксида хрома позволяет обеспечить более высокую их стойкость у пластин из двухкомпонентных твёрдых сплавов Т15К6 и Т14К8 по сравнению с пластиной из однокомпонентного сплава ВК8.

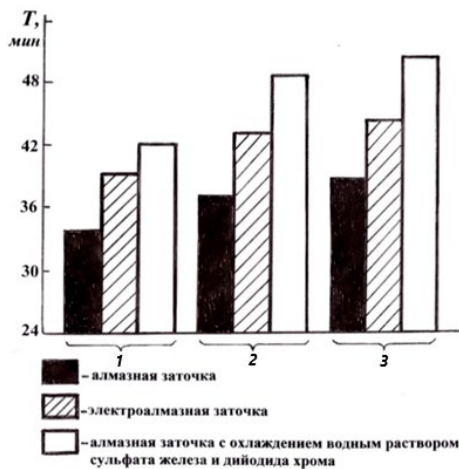


Рис. 2. Гистограмма стойкости режущих пластин из твёрдых сплавов при различных способах их заточки:
1 – ВК8; 2 – Т15К6; 3 – Т14К8

Fig. 2. Histogram of resistance of cutting plates made of sintered-hard alloys at various temperatures methods of sharpening them:
1 – VK8; 2 – T15K6; 3 – T14K8

Важнейшим показателем эффективности использования металлорежущего инструмента является обеспечение постоянства значений его стойкости после каждой переточки, что особенно важно при проектировании автоматизированных технологических систем изготовления изделий различного назначения, обеспечивающих ускоренную адаптацию их к решению конкретных производственных задач [1, 12]. Результаты выполненных исследований приведены на рис. 3, из анализа которых следует, что заточка спиральных свёрл из быстрорежущей стали Р6М5 импрегнированным диоксидом хрома абразивным чашечным кругом с подачей йодосодержащей охлаждающей жидкости (кривая 4) позволяет не только повысить стойкость свёрл более чем в 1,5 раза по сравнению с абразивной заточкой без

охлаждения (кривая 1) и обеспечивает более высокую стойкость по сравнению с алмазной (кривая 2) и электроалмазной (кривая 3) заточками, но и практически полностью исключает разброс стойкостей свёрл по мере их последовательных заточек, что особенно важно при использовании в машиностроительном производстве многоинструментальных наладок [2, 12].

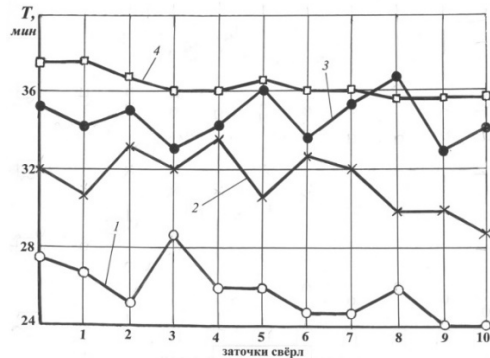


Рис. 3. Значения стойкостей свёрл T из быстрорежущей стали Р6М5 после их заточки:
1 – абразивным кругом без охлаждения; 2 – алмазным кругом; 3 – электроалмазной заточки; 4 – импрегнированным диоксидом хрома абразивным кругом с подачей йодосодержащей охлаждающей жидкости

Fig. 3. Resistance values of T drills made of rapid steel P6M5 after their sharpening:
1 – using an abrasive wheel without cooling; 2 – using a diamond wheel; 3 – using an electric diamond tool grinding; 4 – using an abrasive wheel, diiodide chromium-impregnated, supplying an iodine-containing liquid coolant

Были выполнены исследования состояния материала поверхностного слоя задней поверхности сверла, полученные после каждого способа их заточки. С помощью портативного профилографа с компьютерным управлением «Surftest-210» определялся начальный параметр шероховатости задней поверхности сверла после его заточки Ra . Разброс микротвёрдости материала задней поверхности сверла после его заточки ΔH определялся при помощи твёрдомера портативного ультразвукового МЕТ-У1 по десяти точкам замеров. Определение внутрикристаллического напряжения в материале поверхностного слоя задней поверхности сверла после заточки $\Delta\sigma/a$ было выполнено по рентгенограммам, снятым с задней поверхности сверла на дифрактометре ДРОН-2.

Результаты выполненных исследований представлены в табл. 2, из анализа которой следует, что применение заточки свёрл из быстрорежущей стали импрегнированными абразивными кругами с подачей в зону обработки йодосодержащей СОТС существенно снижает

шероховатость рабочих поверхностей инструмента за счёт нивелирования микронеровностей образовавшимися йодидами железа [9] при одновременном снижении напряжения материала

поверхностного слоя. Это способствует повышению стойкости инструмента и уменьшению её разброса в процессе повторных заточек.

2. Показатели качества поверхностного слоя задней поверхности сверла при различных способах заточки

2. Quality indicators of the surface layer of the back surface of the drill with various sharpening methods

Способ заточки	Ra , мкм	H_v , ГПа	ΔH_v , ГПа	$\Delta a/a$, МПа	ΔT , мин
Абразивным кругом	0,85	2,8	0,7	39,6	4,5
Алмазным кругом	0,40	2,4	0,6	32,4	4,0
Электроалмазная заточка	0,32	2,1	0,5	28,5	3,5
Импрегнированным диоксидом хрома абразивным кругом	0,32	1,9	0,3	26,2	2,0

На металлографическом микроскопе МИМ-8М проведены исследования начальной топографии поверхностного слоя задней поверхности сверла после того или иного способа заточки (рис. 4 (увеличение 24)). Результаты исследований показали, что способ заточки сверла из быстрорежущей стали

импрегнированным диоксидом хрома абразивным кругом с подачей йодосодержащей охлаждающей жидкости позволяет получать поверхность практически без рисок со сформировавшимся на ней слое йодидов железа, обладающих низким коэффициентом трения.

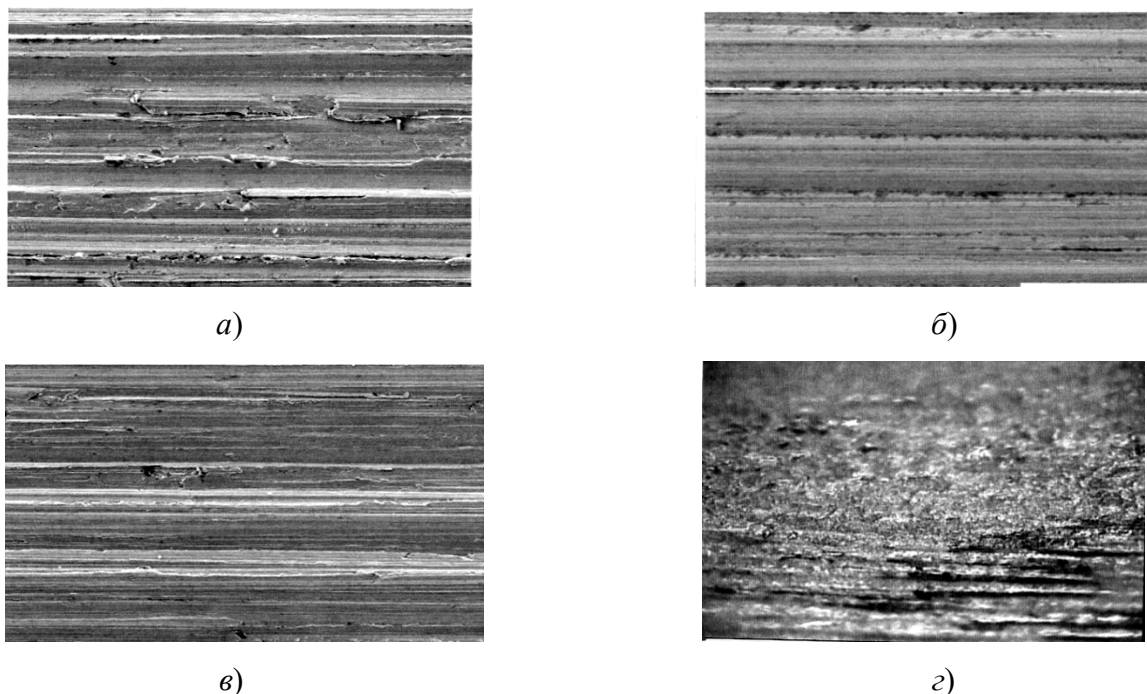


Рис. 4. Начальная топография задней поверхности сверла после его заточки абразивным кругом без охлаждения (а), алмазным кругом (б), электроалмазной заточки (в) и импрегнированным диоксидом хрома абразивным кругом с подачей йодосодержащей охлаждающей жидкости (г)

Fig. 4. The initial topography of the back surface of the drill after grinding operation using an abrasive wheel with no cooling (a), a diamond wheel (b), an electro-diamond grinding (c) using a chromium dioxide-impregnated abrasive wheel supplying of iodine-containing cooling liquid (d)

Выводы

1. Выполненные сравнительные исследования различных способов заточки металло-режущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов показали, что высокая эффективность по стойкости инструмента и показателям качества обработанной поверхности детали достигается в том случае, когда в процессе заточки в зону обработки вводится диоксид хрома путём импрегнирования абразивного круга или добавлением в используемую охлаждающую жидкость.

2. Результаты выполненных исследований позволяют технологам машиностроительных предприятий из многообразия существующих способов заточки металло-режущих инструментов, направленных на повышение их стойкости, принимать наиболее эффективные для конкретных технологических процессов обработки деталей с учётом производственных условий предприятия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бутенко В.И.** Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2017. 481 с.
2. **Научные** основы технологии машиностроения: учеб. пособие / А.С. Мельников, М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко [и др.]. СПб: Лань, 2018. 420 с.
3. **Nagewaran T., Philipp H., Zeman P., Klement U.** Effects of highpressure cooling in the flank and rake faces of WC tool on the tool wear mechanism and process conditions in turning of alloy 718// *Wear*, 2010. Vol. 37. P. 434–435.
4. **Hennersperger G.** Towards MRI-based autonomous robotic US acquisition: a first feasibility study. *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2016. Vol. 36. № 2. P. 538–548.
5. **De Filippis I., Guglieri G., Quagliotti F.** Path planning strategies for UAVS in 3D environments *Journal of Intelligent & Robotic Systems, Theory App.* 2012. Vol. 65, № 1-4. P. 247– 264.
6. **Бутенко В.И., Кадач Р.Г.** Исследование эффективности способов заточки металло-режущих инструментов из быстрорежущей стали // *Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: сб. тр. науч.-техн. конф.* Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023. С. 96–101. <https://ntb.donstu.ru/content/2023265>.
7. **Бутенко В.И., Кадач Р.Г.** Исследование эффективности способов заточки режущих пластин из твёрдого сплава // *Перспективные направления развития отделочно-упрочняющих и виброволновых технологий: сб. тр. научного семинара.* Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023. С. 82–88. <https://ntb.donstu.ru/content/2023526>.
8. **Бутенко В.И., Прокопец Г.А.** Поверхностно-

активные вещества в процессах абразивной обработки материалов. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2021. 158 с.

9. **Применение** йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин / В.И. Бутенко. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2023. 242 с.

10. **Бутенко В.И., Куприк А.В.** Технико-экономическая оценка эффективности использования йодосодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при выполнении сверлильных операций // *Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей.* Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. С. 20–26. <https://ntb.donstu.ru/content/2022436>.

11. **Технологическая** совместимость функциональных слоёв и покрытий / В.И. Бутенко. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. 169 с

12. **Zheng G., Qia X., Eynard B., Bai J., Li J., Zhang Y.** SME-oriented flexible design approach for robotic manufacturing systems // *J. Manuf. Syst.*

REFERENCES

1. Butenko V.I. Scientific fundamentals of functional engineering of machinery surface layer. Rostov-on-Don: Publishing house of the DSTU Center, 2017, 481 p.
2. Scientific foundations of engineering techniques: study guide/ A.S. Melnikov, M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, et al.]. St. Petersburg: Lan, 2018, 420 p.
3. Nagewaran T., Philipp H., Zeman P., Klement U. Effects of highpressure cooling in the flank and rake faces of WC tool on the tool wear mechanism and process conditions in turning of alloy 718// *Wear*, 2010. Vol. 37. P. 434–435.
4. Hennersperger G. Towards MRI-based autonomous robotic US acquisition: a first feasibility study. *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2016. Vol. 36. № 2. P. 538–548.
5. De Filippis I., Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments *Journal of Intelligent & Robotic Systems, Theory App.* 2012. Vol. 65, № 1-4. P. 247– 264.
6. Butenko V.I., Kadach R.G. Investigation of the effectiveness of methods for sharpening metal-cutting tools made of rapid steel // *Modern trends in the development of tool systems and metalworking complexes: proceedings of scientific and technical. conf.* Rostov-on-Don: DSTU, 2023. pp. 96–101. <https://ntb.donstu.ru/content/2023265>.
7. Butenko V.I., Kalach R.G. Investigation of the effectiveness of methods for sharpening stintered-hard alloy cutting plates // *Promising directions for the development of finishing-strengthening and vibration-wave technologies: proc. of scientific seminar.* Rostov-on-Don: DSTU, 2023. pp. 82–88. <https://ntb.donstu.ru/content/2023526>.
8. Butenko V.I., Prokopets G.A. Surfactants in the abrasive processing operation of materials. Rostov-on-Don: Publishing house of the DSTU Center, 2021. 158 p.
9. The use of iodine and its compounds in the processing and operation of machine parts / V.I. Butenko. Rostov-on-Don: Publishing house of the DSTU Center, 2023. 242 p.

10. Butenko V.I., Kuprik A.V. Technical and economic assessment of the effectiveness of the use of iodine-containing lubricating and cooling technological means in performing drilling operations // Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of high-tech technological systems for shaping and assembling products: proc. of international scientific symposium of engineering technologists. Rostov-on-Don: DSTU, 2022. pp. 20–26. <https://ntb.donstu.ru/content/2022436>

11. Technological compatibility of functional layers and coatings / V.I. Butenko. Rostov-on-Don: DSTU, 2020. 169 p.

12. Zheng G., Qia X., Eynard B., Bai J., Li J., Zhang Y. SME-oriented flexible design approach for robotic manufacturing systems // J. Manuf. Syst. 2019. Vol. 51. P. 62–74.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024; одобрена после рецензирования 26.06.2024; принята к публикации 09.07.2024.

The article was submitted 17.06.2024; approved after reviewing 26.06.2024; accepted for publication 09.07.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.11.2024. Выход в свет 29.11.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

