

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.923.6; 54.38; 544.162; 548.312

Влияние различных импрегнаторов абразивных кругов на эффективность заточной операции

В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

В работе выполнен сравнительный анализ химически активных веществ, применяемых для импрегнирования абразивного инструмента при выполнении операции заточки резцов из быстрорежущей стали Р6М5К5. В ходе исследований установлено, что использование кругов, обработанных в йодсодержащем водном растворе, способствует существенному повышению стойкости оснастки при обработке конструкционного сплава 12ХМФ. Данный эффект достигается за счёт минимизации коэффициента трения и сопутствующего снижения температурных показателей в зоне резания. Составы, включающие соединения хлора и серы, продемонстрировали менее выраженную эффективность в сравнении с йодсодержащими реагентами. Подобные результаты объясняются интенсификацией процесса образования радикалов йода вследствие низкой энергии связей в молекулах, а также преобладающими антифрикционными характеристиками формируемого йодида железа.

Ключевые слова: импрегнирование, заточная операция, йод, стойкость инструмента, средняя температура, хлор, сера

Для цитирования. Бутенко В.И., Кадач Р.Г. Влияние различных импрегнаторов абразивных кругов на эффективность заточной операции. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(5):5–9.

The Effect of Different Agents for Grinding Wheel Impregnation on the Efficiency of Sharpening Operation

Viktor I. Butenko, Roman G. Kadach

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article presents a comparative analysis of the chemically active compounds designed for impregnation of abrasive tools used for sharpening the cutters made of R6M5K5 high-speed steel. In the frame of the research, it has been ascertained that treating the grinding wheels with the iodine-containing aqueous solution significantly increases the wear resistance of abrasive tools during machining 12KhMF structural alloy. This effect is achieved by minimizing the coefficient of friction, which results in reduction of temperature in the cutting zone. The impregnators containing chlorine and sulfur compounds proved to be less efficient compared to the iodine-containing ones. Such results could be explained by more active formation of iodine radicals due to the low binding energy in the molecules, as well as by the predominant antifriction properties of the ferric iodide formed.

Keywords: impregnation, sharpening operation, iodine, wear resistance of the tool, mean temperature, chlorine, sulfur

For Citation. Butenko VI, Kadach RG. The Effect of Different Agents for Grinding Wheel Impregnation on the Efficiency of Sharpening Operation. *Young Researcher of Don*. 2026;11(5):5–9.

Введение. Существует значительное количество способов повышения эффективности заточных операций, одним из которых является импрегнирование абразивного инструмента. Данная технология относится к наиболее результативным методам повышения производительности, а также качества процессов шлифования и заточки в различных видах машиностроительного производства, поскольку обработка кругов составами со специально подобранными свойствами позволяет целенаправленно управлять физико-химическими процессами в зоне обработки [1]. Импрегнирование оказывает положительное влияние практически на все показатели шлифования и

заточки, включая технологические остаточные напряжения, шероховатость обработанной поверхности, режущую способность, износ и стойкость абразивного инструмента [2].

В качестве импрегнаторов чаще всего применяют графит, фторированный углерод, парафин, стеариновую кислоту, фенолформальдегидные смолы, мелкодисперсные порошки твёрдых смазок, натриевые мыла высокомолекулярных жирных кислот, а также различные химически активные вещества (ХАВ). При повышенной температуре в зоне шлифования компоненты, находящиеся в порах круга, могут переходить в жидкое, пастообразное или газообразное состояние, формируя пограничный слой между контактирующими поверхностями и тем самым снижая коэффициент трения.

Эффективность импрегнаторов во многом определяется продуктами их распада, проникающей способностью, активностью взаимодействия с обрабатываемым материалом и свойствами конечного продукта реакции химически активного вещества с металлами [3]. В связи с этим в последнее время особое внимание уделяется соединениям, способным формировать в рабочей зоне газовую среду с высокой проникающей способностью [4]. Также широко известно, что соединения элементов VI группы (халькогенов) и VII группы (галогенов) Периодической системы химических элементов обладают высокой реакционной способностью по отношению к металлам, особенно при повышенных температурах, и способны образовывать газовые среды путём сублимации и испарения [5]. Наибольшее распространение получили соединения йода, хлора и серы.

Среди халькогенов широкое применение получила сера [6]. Импрегнирование чаще всего проводят расплавом серы. Известно, что сера является минералом с выраженными антифрикционными и противобактериальными свойствами. При импрегнировании шлифовальных кругов серой на обрабатываемых поверхностях детали образуются сульфидные плёнки, сохраняющие эффективность до температуры 800 °С. Указанные плёнки, предотвращают непосредственный контакт свежеработанных (ювенильных) поверхностей металла с абразивными зёрнами, вследствие чего снижается интенсивность процессов диффузии, адгезии и молекулярного схватывания между ними. Одновременно в среде серы погибают бактерии и микробы, появление которых в порах шлифовального круга обусловлено применением различных СОТС на органической основе. Кроме того, в отдельных случаях пропитка шлифовальных кругов серой позволяет исключить последующую упрочняющую обработку поверхности детали в результате её «бакелизации», что уменьшает потери деталей от брака. Импрегнирование шлифовальных кругов серой повышает эксплуатационные показатели, в частности производительность и стойкость, например, при шлифовании изделий из подшипниковых сталей [6].

К числу наиболее активных элементов группы галогенов относятся хлор и йод. Эффективность применения хлорсодержащих веществ, например, четырёххлористого углерода, дихлорэтана, трихлорэтана и др., в качестве добавок в СОТС при металлообработке объясняется наличием в них активных атомов хлора или его радикалов, которые, взаимодействуя с ювенильными поверхностями обрабатываемых металлов, образуют хлорсодержащие соединения — хлориды. Результативность применения таких СОТС определяется присутствием в молекулах активных атомов хлора и его радикалов. Широко известна высокая смазочная способность хлорированных масел и парафина, четырёххлористого углерода, дихлорэтана и трихлорэтана. В основе их смазочного действия лежит способность хлорсодержащих молекул при контакте с ювенильной поверхностью или под действием температуры выделять атомарный хлор [7].

В технологии машиностроения представлены исследования, анализ которых показывает, что высокие эксплуатационные показатели достигаются при использовании в качестве импрегнаторов веществ, содержащих йод и его соединения [8].

В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительных экспериментальных исследований эффективности применения различных составов для импрегнирования абразивных кругов, содержащих химически активные вещества (ХАВ), на операции заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущих сталей.

Результаты исследований. По составу импрегнатора были исследованы следующие способы заточки:

- абразивный круг, не подвергнутый импрегнированию;
- абразивный круг, импрегнированный водным раствором диiodида хрома (CrI_2 — 2 %, вода — остальное);
- абразивный круг, импрегнированный водным раствором хлористого аммония (NH_4Cl — 2 %; вода — остальное);
- абразивный круг, импрегнированный водным раствором сернокислого аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — 2 %; вода — остальное);
- абразивный круг, импрегнированный тетраметилтиурамдисульфидом $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2\text{S}_4$ в ацетоне ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2\text{S}_4$ — 3,5 %, ацетон — остальное) [9];
- абразивный круг, импрегнированный гексахлорпараксиолом $\text{C}_8\text{H}_4\text{Cl}_6$ в толуоле ($\text{C}_8\text{H}_4\text{Cl}_6$ — 36 %, толуол — остальное) [10].

Импрегнированию подвергались абразивные круги типа ПП размерами 175×40×32 (ГОСТ 2 424–83), изготовленные из электрокорунда нормального 14А, зернистостью F60, номером структуры 7, среднемягкой твёрдости

К7, на керамической связке V (ГОСТ Р 052587–2006). Импрегнирование осуществляли методом свободного капиллярного поднятия с окунанием круга в жидкость с растворённым импрегнатором.

В качестве инструментов использовались свёрла диаметром 16 мм из быстрорежущей стали Р6М5К5. Заточка инструментов производилась на универсально-заточном станке модели 3А64М. Режимы обработки: $v = 13,2$ м/с; $S_{пр} = 0,06$ м/с; $S_{поп} = 0,02$ мм/дв. ход. Была принята следующая геометрия свёрл: $2\phi = 118 \pm 1^\circ$, $\psi = 55^\circ$, $B = 2,5$ 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-1М при помощи специальной подставки [6]. Средняя температура в зоне резания при сверлении $\Theta_{ср}$ определялась методом естественной термопары.

Сверление заготовок из стали 12ХМФ в виде брусков с размерами $B \times H \times L = 80 \times 30 \times 200$ мм осуществлялось на вертикально-сверлильном станке мод. 2Н135 без охлаждения на следующих режимах: $V = 0,33$ м/с ($n = 500$ об/мин), $S = 0,15$ мм/об.

Определение h_z и $\Theta_{ср}$ осуществлялось через 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 просверленных отверстиями. По достижению величины износа, равного принятому критерию $h_z = 0,8$ мм, определялась стойкость сверла T умножением времени сверления одного отверстия $t_0 = 0,5$ мин на количество просверленных отверстий.

Из анализа таблицы 1 следует, что применение абразивного круга, подвергнутого импрегнированию йодсодержащим составом, обеспечивает формирование поверхности металлорежущего инструмента, которая при контакте с материалом заготовки характеризуется меньшей температурой и наибольшей стойкостью к износу. Представленные результаты экспериментальных исследований по показателям T и $\Theta_{ср}$ могут быть объяснены наименьшей среди исследуемых химически активных веществ прочностью связи в молекулах (таблица 2) [7].

Таблица 1

Показатели качества металлорежущего инструмента и процесса обработки
в зависимости от используемого состава для импрегнирования

Показатели качества	№ составов для импрегнирования					
	1	2	3	4	5	6
Стойкость инструмента T , мин	24,6	36,7	34,4	30,3	33,5	35,2
Средняя температура в зоне резания $\Theta_{ср}$, °C	240	190	208	220	215	200

Таблица 2

Зависимость между прочностью связей между атомами
в некоторых молекулах галогенов и халькогенов

Компонент	Тип связи	Прочность связи, ккал/моль
Cl_2	Cl – Cl	57,2
Br_2	Br – Br	45,4
I_2	I – I	35,5
S_2	S – S	63,0

В процессе заточной операции в результате различных энергетических воздействий, включая тепловые, силовые и электрические, происходит разрушение молекул химически-активного вещества на радикалы, которые участвуют в поверхностных химических реакциях образуя соединения с металлами [8]. Исходя из данных, представленных в таблицах 1 и 2, можно сделать вывод о том, что низкая энергия связи в молекуле способствует более активному образованию радикалов.

Немаловажным фактором, влияющим как на стойкость металлорежущего инструмента T , так и на среднюю температуру в зоне резания $\Theta_{ср}$, является структура продукта реакции химически-активного вещества с металлом. Известно, что соединения FeI_2 , $FeCl_2$ и FeS являются слоистыми соединениями с гексагональной сингонией, в которых внутри слоя действуют прочные химические связи, а между слоями действуют слабые Ван-дер-Ваальсовы силы. И чем менее плотная упаковка атомов в кристаллической решётке, тем легче слоям «скользить» друг относительно друга, и, соответственно, тем ниже коэффициент трения. Осуществить приближённую численную оценку свободного пространства в кристаллической ячейке можно через нахождение объёма кристаллической ячейки и вычитания из него соответствующих объёмов атомов.

Согласно источнику [11], объём гексагональной ячейки вычисляется по формуле:

$$V_{эл} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a^2 \cdot c, \quad (1)$$

где, a и c — параметры кристаллической решётки.

Параметры кристаллической решётки для йодида железа FeI_2 : $a = b = 0,404$ нм; $c = 0,675$ нм; $z = 1$ [12]; $R_I = 0,206$ нм [13]. Для хлорида железа $FeCl_2$: $a = b = 0,357$ нм; $c = 1,71$ нм; $z = 3$ [14]; $R_{Cl} = 0,181$ нм [15]; для сульфида железа FeS : $a = b = 0,343$ нм; $c = 0,588$ нм; $z = 2$ [16]; $R_{S^{2-}} = 0,170$ нм [13]; $R_{Fe^{2+}} = 0,063$ нм [13]. Подставив справочные значения в формулу (1), получим объёмы элементарных кристаллических ячеек для трёх соединений: $V_{эл}FeI_2 = 0,286$ нм³; $V_{эл}FeCl_2 = 0,571$ нм³; $V_{эл}FeS = 0,197$ нм³. Однако данные соединения имеют различное количество формульных единиц в ячейках, для сравняемого объёма на одну формульную единицу, необходимо разделить данный показатель на z : $V_{эл}FeI_2 = 0,286$ нм³; $V_{эл}FeCl_2 = 0,190$ нм³; $V_{эл}FeS = 0,0985$ нм³.

Принимается допущение о том, что объём иона считаем равным объёму сферы с соответствующим радиусом, который можно вычислить по формуле:

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3}, \quad (2)$$

где R — радиус иона, нм.

В результате расчёта по формуле (2) получены следующие значения объёмов ионов: $V_I = 0,036$ нм³; $V_{Cl} = 0,0247$ нм³; $V_{S^{2-}} = 0,02$ нм³; $V_{Fe^{2+}} = 0,00196$ нм.

Для расчёта свободного объёма $V_{с.о.}$ в кристаллической решётке вычтем объёмы ионов химических соединений из объёмов элементарных ячеек:

$$V_{с.о.} = V_{эл} - \sum V_{ионов}. \quad (3)$$

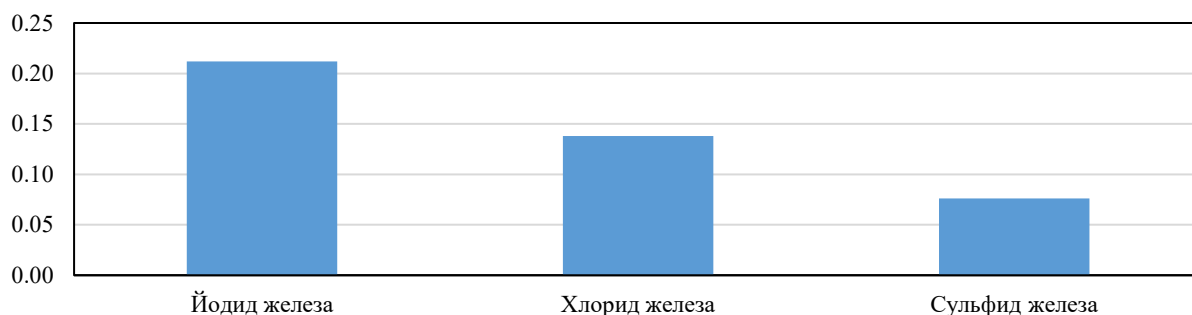


Рис. 1. Объём свободного пространства в элементарной ячейке кристаллической решётки соединения химически-активного вещества с железом, приходящийся на одну формульную единицу, нм³

Произведя сравнение объёма кристаллической ячейки с объёмом ионов, с учётом количества формульных единиц (рис. 1), видно, что объём пустот в кристаллической ячейке йодида железа FeI_2 (0,212 нм³) больше, чем для хлорида железа $FeCl_2$ (0,138 нм³) и для сульфида железа FeS (0,076 нм³). Из чего можно сделать вывод о том, что йодид железа имеет более выраженные антифрикционные свойства.

Заключение. Выполненные исследования влияния различных импрегнаторов на эффективность заточной операции металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали показали, что наилучшие результаты по показателям стойкости инструмента и температуры в процессе механической обработки достигаются при обработке абразивных кругов водными растворами, содержащими йод и его соединения. Установленный эффект обусловлен как свойствами молекул йода, формирующихся в зоне резания, так и характеристиками конечного продукта реакции химически активного вещества с затачиваемой поверхностью металлорежущего инструмента.

Список литературы

1. Рыжкин А.А. *Обработка материалов резанием: физические основы*. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ; 1995. 241 с.
2. Носенко В.А., Крутикова А.А. Повышение эффективности шлифования импрегнированным абразивным инструментом, выделяющим активные газовые среды. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018;14(2):125–131.
3. Крутикова А.А. *Влияние импрегнаторов, выделяющих при термическом разложении химически активные газовые среды, на свойства абразивного инструмента и показатели процесса шлифования*. Волгоград; 2019. 19 с.
4. Носенко В.А., Митрофанов А.П., Наумов А.Г. Модель химического взаимодействия импрегнаторов абразивного инструмента с обрабатываемым металлом. *СТИН*. 2014;(3):12–15.

5. Чурилин А.В., Жуков Н.П. Импрегнирование инструмента с целью повышения энергоэффективности абразивной обработки. *Достижения вузовской науки*. 2013;(6):127–131.
6. Бутенко В.И., Прокопец Г.А. *Поверхностно-активные вещества в процессах абразивной обработки материалов*: монография. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2021. 159 с. URL: https://ntb.donstu.ru/system/files/2021-131_butenko_mng.pdf (дата обращения: 15.05.2026).
7. Латышев В.Н. *Повышение эффективности СОЖ*. Москва: Машиностроение; 1975. 89 с. URL: https://cloud.mail.ru/public/ckRG/ZfgFymbHU?dialog=EBOOK_READER&from=viewer (дата обращения: 15.05.2026).
8. Бутенко В.И. *Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин*: монография. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2023. 243 с. URL: https://ntb.donstu.ru/system/files/2023-1060_butenko_mng_0.pdf (дата обращения: 16.05.2026).
9. Носенко В.А., Крутикова А.А., Новопольцева О.М., Митрофанов А.П. *Состав для пропитки абразивного инструмента*. Патент РФ, № 2595790. 2016.
10. Крутикова А.А., Носенко В.А., Новопольцева О.М., Митрофанов А.П. *Состав для пропитки абразивного инструмента*. Патент РФ, № 2532615. 2014.
11. Белим С.В., Лях О.В., Тихомиров И.В. *Кристаллография: практикум*. Омск: ОмГТУ; 2024. 164 с.
12. Ролстен Р.Ф. *Йодидные металлы и йодиды металлов*. Москва: Металлургия; 1968. 524 с.
13. Хьюи Дж. *Неорганическая химия*. Москва: Химия; 1987. 696 с.
14. Фурман А.А. *Неорганические хлориды (Химия и технология)*. Москва: Химия; 1980. 416 с.
15. *Краткий справочник физико-химических величин*. Ленинград: Химия; 1983. 232 с.
16. Самсонов Г.В., Дроздов С.В. *Сульфиды*. Москва: Металлургия; 1972. 303 с.

Об авторах:

Роман Геннадьевич Кадач, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, rkad925@mail.ru

Виктор Иванович Бутенко, профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, butenkowiktor@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Roman G. Kadach, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), rkad925@mail.ru.

Viktor I. Butenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), butenkowiktor@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.