

Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов

В.Ю. Попов^{1а}, А.С. Янышкин^{1б}, О.И. Медведева,^{1с} В.Ю. Скиба^{2д}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, пр. К.Маркса 20, Новосибирск Россия

^аberkutoff@rambler.ru, ^бyanyushkin@brstu.ru, ^сm.olgaiv@yandex.ru, ^дskeeba_vadim@mail.ru

Статья поступила 03.06.2014, принята 03.06.2014

Данная работа направлена на повышение производительности и экономичности процесса шлифования и затачивания на базе исследования условий контактного взаимодействия отдельно взятого абразивного зерна и поверхности круга с различными обрабатываемыми материалами, прежде всего с инструментальными быстрорежущими сталями, твердыми сплавами и современными наноматериалами. В статье рассмотрены вопросы, связанные с проблемой обрабатываемости инструментальных сталей, которые все еще широко распространены при изготовлении металлорежущих и деревообрабатывающих инструментов. Обладая рядом достоинств, они имеют и серьезные недостатки – повышенную склонность к обезуглероживанию и довольно высокую чувствительность к перегреву, что снижает их износостойкость. Центральное место в статье занимают вопросы потери работоспособности алмазных кругов и обрабатываемости инструментальных материалов, от решения которых зависят качество и эксплуатационные свойства машиностроительной продукции. В последние годы изучению этих процессов посвящено значительное количество исследований, но лишь отдельные работы содержат данные на микро- и субмикроровнях.

Ключевые слова: быстрорежущие стали, шлифование, алмазные круги, металлическая связка, комбинированная электроалмазная обработка, инструментальные материалы, адгезивно-диффузионные явления, засаливание.

Contact processes in diamond treatment of tool materials

V.Y. Popov^{1а}, A.S. Yanyushkin^{1б}, O.I. Medvedeva^{1с}, Skeeba V.Y.^{2д}

¹Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, Russia

^аberkutoff@rambler.ru; ^бyanyushkin@brstu.ru; ^сm.olgaiv@yandex.ru, ^дskeeba_vadim@mail.ru

Received 03.06.2014, accepted 03.06.2014

This work is aimed at improving the productivity and efficiency of the process of grinding and sharpening based on the study of the conditions of contact interaction of individual abrasive grains and the surface of a circle with various materials processing - primarily instrumental high speed steels, hard alloys and advanced nanomaterials. The article discusses issues related to the problem of machinability produce, which are still widely used in the manufacture of metal and woodworking tools. With a number of advantages, they have serious drawbacks - increased tendency towards decarbonization rather high sensitivity to overheat, which reduces their durability.

In the center, there are issues of loss of efficiency of diamond wheels and workability of tool materials, the solution of which depends on the quality and performance of engineering products. In recent years, the study of these processes devoted a considerable amount of research, but only a few papers contain data on micro and submicrolevels.

Keywords: high speed steels, grinding, diamond wheels, metal bonds, combined electric diamond grinding, tool steel, adhesive-diffusion blockage, loading.

Введение. Представление различных авторов о природе дефектного слоя, образующегося в процессе алмазной обработки, известного под названием белого слоя, весьма противоречивы [1 – 4]. Согласно мнению одних исследователей он состоит из безигольчатого мартенсита, других – из аустенита, третьи считают его структурой, обогащенной кислородом или азотом.

В уточнении нуждаются и рекомендации по выбору смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) для сверхтвердых абразивных материалов на основе кубического нитрида бора (эльбора, алмаза и других

дисперсноупрочненных материалов). Также в литературе отсутствуют рекомендации по применению износостойких алмазных кругов на металлической связке для шлифования и затачивания режущего инструмента из инструментальных сталей.

В данной работе ставились следующие задачи:

- исследовать характер, темп и механизм износа различных абразивных материалов;
- изучить строение поверхностного слоя заточенного инструмента;

– установить влияние различных СОТС на процесс шлифования и затачивания;

– разработать и внедрить в производство комплекс средств, позволяющих повысить качество режущего инструмента и производительность операций шлифования и затачивания.

Методика проведения исследований контактирующих поверхностей. Все исследования проводились на операции шлифования на универсально-заточных станках моделей 3Д642Е и 3Е642Е, модернизированных [5 – 9] под технологию комбинированной электроалмазной обработки (КЭАО).

Характер износа исследовался при микрорезании отдельными зёрнами, блоками или спеками из электрокорунда, карбида кремния, синтетического алмаза и кубического нитрида бора. Режимы обработки: ско-

рость резания $V = 33$ м/с; поперечная подача $S_{\text{поп.}} = 0,01 \dots 0,1$ мм/дв.ход; продольная подача $S_{\text{пр.}} = 0,5 \dots 0,6$ мм/мин.

Экспериментальные исследования качества поверхности АШК. Судя по микрофотографиям, характер износа исследованных материалов весьма различен: на абразивных зёрнах наблюдаются разрушения, вырывы и налипы, свидетельствующие об абразивной, механической и адгезионной природе износа. При длительной обработке видны блестящие площадки, имеющие диффузионную природу, а также вырывы отдельных зёрен с поверхности круга под действием сил резания. Износ отдельных зёрен имеет абразивный характер, переходящий затем в химико-абразивный, о чем свидетельствует рис. 1.

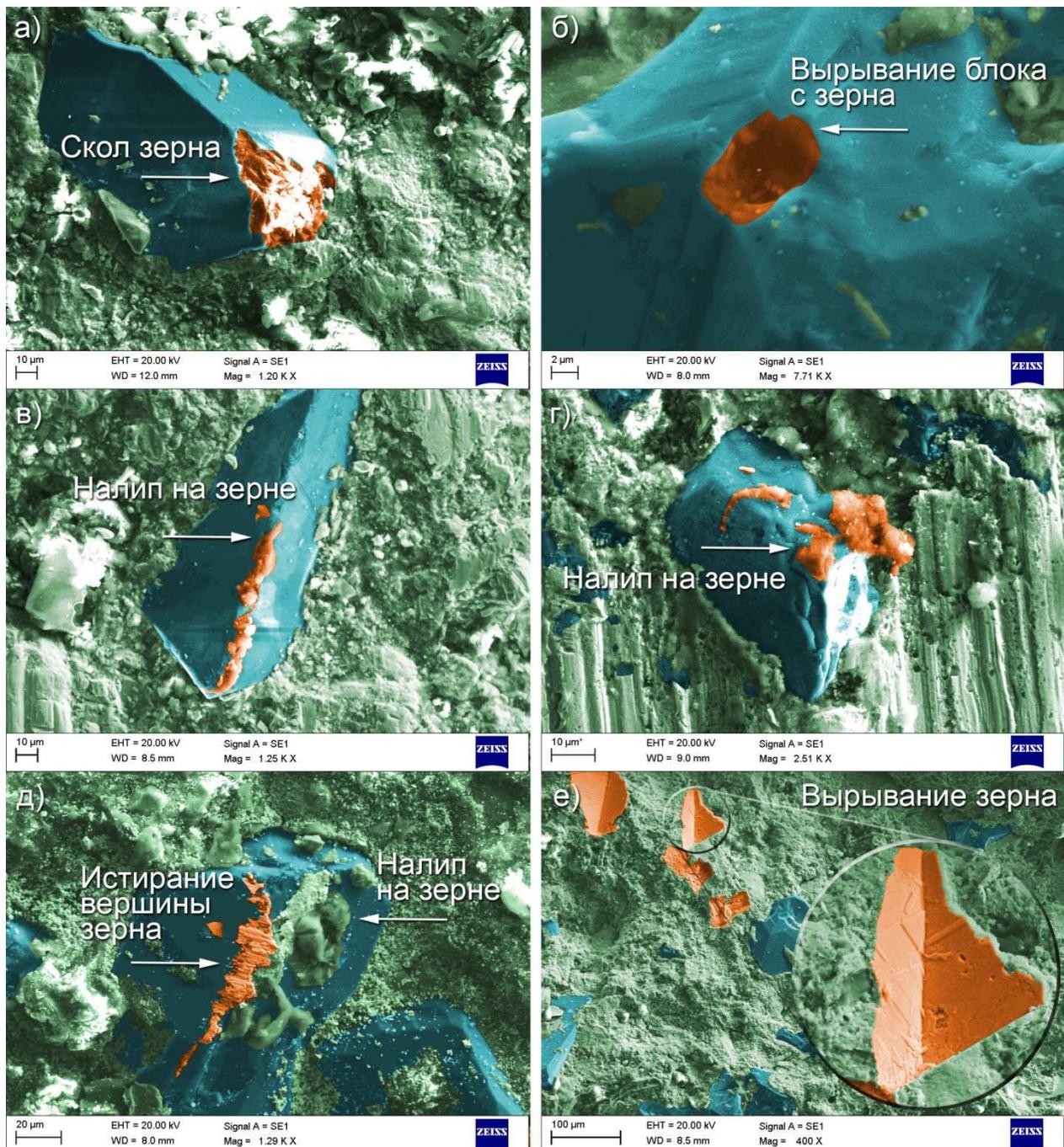


Рис. 1. Характер износа абразивного инструмента под действием различных факторов

В начале работы на абразивных зернах видны следы абразивного износа в виде сколов (рис. 1 а, б), затем появляются налипы (рис. 1 в, г), а позже – площадки износа (рис. 1 д) и вырывание абразивных зерен (рис. 1 е), характеризующие адгезионный износ, который доминирует до конца принятого периода стойкости.

Экспериментальные исследования качества обработанной поверхности. Изучением второго контртела – обрабатываемого материала, пластины из Р6М5, установлено следующее. В лунках, образовавшихся при микрорезании алмазными и электрокорундовыми зернами, после травления материала выявляется зона повышенного скопления карбидов.

На пластинах, заточенных алмазными и электрокорундовыми кругами, на более интенсивных, «жестких» режимах, вместо скопления карбидов, появляется сплошной белый слой, но после затачивания эльборовым кругом он не обнаружен. Глубина и строение дефектной зоны определяются функцией ряда переменных и в первую очередь – качеством термообработки и режимов резания. Например, с увеличением поперечной и продольной подачи дефектная зона увеличивается, причем на пластинах с качественной термообработкой – в меньшей мере.

Представленные данные позволяют в первом приближении установить взаимосвязь между характером износа и появлением дефектного слоя. Исследование внутреннего строения дефектного слоя может быть выполнено только при помощи тонких методов, с использованием специальных приемов, позволяющих получить граничные слои достаточных размеров.

Дело в том, что время контакта зерна с обрабатываемым материалом скоротечно ($10^{-5} \dots 10^{-6}$ °С), и граничные слои имеют, как правило, весьма малые размеры, и даже такие тонкие методы, как растровая микроскопия, рентгеноструктурный и химический анализы этих слоев, образующихся в процессе микрорезания, чрезвычайно затруднительны из-за недостаточной чувствительности. С целью получения контактного граничного слоя значительных размеров для предварительной оценки процессов в этой зоне они изучались при шлифовании алмазными кругами на металлических связках всухую (без СОТС).

Изучение границы контакта растровой микроскопией показало резко измененную топографию поверхности контакта по сравнению с исходной (рис. 2).

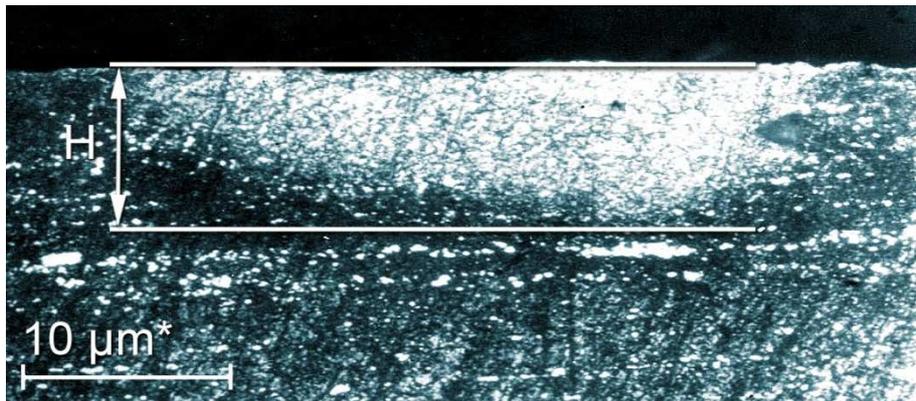


Рис. 2. Дефектный слой обработанной поверхности стали Р6М5, где Н – глубина дефектного слоя, мкм

Концентрационная кривая, снятая с этого участка на микроанализаторе, показала увеличение количества углерода в граничном слое за счет переконцентрации из инструментального и частично – обрабатываемого материалов.

Кроме граничного слоя, исследовалось каждое контртело в отдельности. Рентгенограмма с пластины Р6М5 позволила установить наличие сложных карбидов состава Cr, Fe, Mo, $W_{23}C_6$, W_2C , Mo_2C . Рентгенограмма, снятая на малых углах развертывания, дополнительно выявила сложные оксиды $CoFe_2O_4$, WO_2 , WO_3 . Послойными исследованиями налипов на алмазных зернах было установлено, что он состоит из сильнодеформированного обрабатываемого материала, карбидов и окислов.

По сравнению с эталоном увеличилось количество молибдена, являющегося компонентом стали Р6М5. Наблюдается более интенсивный пик линии кремния, что объясняется наложением на него линии вольфрама.

Вопреки сложившемуся мнению, что поры круга и алмазные зерна всего лишь забиваются компонентами обрабатываемого материала, в засаленном слое наблюдаются элементы как самой связки круга, так и вторичных соединений, образующихся в результате адгезионно-диффузионных явлений, химических реакций и рекристаллизации. Зафиксированные в зоне контакта химические элементы, в частности, алюминий, медь, олово и железо являются продуктами диффузии, которые при взаимодействии с углеродом и кислородом приводят к образованию новых карбидов и окислов. Усиление же и локализация диффузионных процессов возникает при интенсификации режимов шлифования, когда не только локальные, но и средние температуры в зонах контакта достигают высоких значений (более 1000 °С).

Рентгеноструктурные исследования позволили установить наличие новых соединений в составе поверх-

ностного слоя, которые приведены в таблице. Рассмотрим эти соединения каждое в отдельности.

Таблица

Состав поверхности круга ACB 125/100 M1 100 % после шлифования различными методами быстрорежущей стали P6M5

Метод затачивания	Фазы																				
	Алмаз	Feγ	Feα	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	CuSn	CuO	Cr ₃ C ₂	WC	WO ₃	Mo ₂ O ₃	W (Mo)	Fe ₃ Al	Fe ₂ W	WSi ₂	CuAl ₂	VC	VO ₂	Fe ₃ W ₃ C	FeCr	
Эталон (выправленный круг)	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Обработка с непрерывной правкой круга	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Обработка всухую	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+
Фазы P6M5	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+

Соединения с эталонной поверхности алмазного шлифовального круга:

C – алмаз синтетический;

CuO – оксид меди. Образуется нагреванием металлической меди выше 80 °С;

CuAl₂ – интерметаллидное соединение. Продукт межкристаллитной коррозии. Выпадает на границах зерен в виде цепочки и интенсивно растворяется при протекании коррозии с выделением водорода [10];

CuSn – бронза. Материал связки шлифовального круга;

Fe₃Al – сплав. Используется в качестве заменителя нержавеющей стали для производства изделий, работающих при температурах 630-680 °С [11]. Материал корпуса шлифовального круга.

Соединения с поверхности круга после обработки быстрорежущей стали:

C – углерод. Науглероживает сталь во время выпуска путем присадки углеродсодержащих материалов (например, каменный уголь, графит);

Cr₃C₂ – карбид хрома(II). Образуется в результате межкристаллитной коррозии, когда при повышенной температуре атомы углерода диффундируют к границам зерен не только с приграничных зон, но и с объема [10];

Mo₂O₃ – оксид молибдена(III). Возникновение объясняется процессом диффузии атомов молибдена и окисления их кислородом;

W (Mo) – дифракционные линии чистого вольфрама, совпадают с линиями молибдена;

WO₃ – вольфрамовый ангидрид. Образуется при нагревании на воздухе, окислением WC (400-500 °С) и W₂C (550 °С) [12];

WC – карбид вольфрама. Твердое тугоплавкое соединение, образуется при взаимодействии W с C (1400-1500 °С) [12];

W₂C – карбид вольфрама. Образуется нагреванием WO₃ выше 1500 °С [12];

Fe₃W₃C – сложный карбид вольфрама переменного состава;

M₆C – основной карбид быстрорежущей стали;

WSi₂ – дисилицид вольфрама. Образуется взаимодействием W и Si при температуре выше 1400 °С [12];

VO₂ – диоксид ванадия. Знаменит быстротой и резкостью фазового перехода при 68 °С, который превращает его в изолятор [13]. Возникновение объясняется процессом диффузии атомов ванадия и окисления их кислородом;

VC – карбид ванадия. Самостоятельный карбид, выделяется из мартенсита при отпуске быстрорежущей стали. Образуется при наличии самых малых количеств ванадия (0,1 %), если имеется C [14];

Fe₂O₃ – оксид железа(III). Пористая, рыхлая пленка – ржавчина, образуется во влажном воздухе в результате взаимодействия с кислородом;

Fe₃O₄ – оксид железа(II-III). Железная окалина, продукт окисления железа. Образуется при прокаливании Fe₂O₃ в результате взаимодействия с кислородом;

FeCr, Fe₂W – интерметаллиды. Образуются в результате взаимодействия компонентов при сплавлении, при реакциях в твердом состоянии вследствие взаимной диффузии, при распаде пересыщенного твердого раствора одного металла в другом, в результате интенсивной пластической деформации при механическом сплавлении [15];

α-Fe – α-фаза, феррит. Аллотропная модификация устойчива до 768 °С;

γ-Fe – γ-фаза, остаточный аустенит. Аллотропная модификация устойчива в интервале 906-1401 °С. Так как на поверхности круга находится большое количество углерода в виде алмазных зерен, а также после обработки присутствуют легирующие добавки стали P6M5, то превращение γ-Fe в α-Fe не происходит, и наблюдается большое количество остаточного аустенита;

Mn, Ni, Cu, Co, P, S – рентгеноструктурный анализ наличие этих элементов не обнаружил.

Установлено, что в составе засаленного слоя присутствуют компоненты обрабатываемого материала, а также вторичные структуры, образовавшиеся в результате контактного взаимодействия компонентов связки круга, обрабатываемого материала и внешней среды. Следует заметить, что аналогичные данные были получены ранее при затачивании твердых сплавов [16].

Отсюда следует, что ряд этих соединений принадлежит составу стали Р6М5, и они без изменений переходят с затачиваемой поверхности на поверхность круга. Это объясняется адгезионным схватыванием и явлением диффузии на контактирующих поверхностях. Можно сделать вывод о том, что электрохимическая правка не ликвидирует адгезионно-диффузионные процессы и химические реакции, а лишь убирает их продукты с поверхности круга, одновременно растравливая связку. Чтобы нейтрализовать эти процессы, необходимо снизить температуру обработки и давление в зоне контакта, интенсифицирующие эти процессы. В некоторой степени этого удастся достичь растравливанием поверхностного слоя затачиваемого материала. Однако полностью эти процессы не ликвидируются, а только значительно ослабляются. Поэтому необходима дополнительно и правка алмазного круга. Совместить два процесса – анодного растворения поверхности затачиваемой стальной пластины и правки круга позволяет комбинированная электроалмазная обработка.

Результаты и обсуждение. Использование полученных данных при резании дало возможность перейти к целенаправленному изучению контактных слоев, образующихся в реальном процессе затачивания. Методом избирательного травления производился поиск только тех вторичных структур, которые были выявлены в опытах. Электронные фотографии демонстрируют наличие на алмазных зернах карбидов W, Mo, а также окислов железа, т. е. тех же структур, которые были найдены при шлифовании.

Изучение с помощью спектрального анализа поверхностей пластин Р6М5, заточенных алмазным и электрокорундовым кругами, выявило обогащение поверхностного слоя углеродом, чего не установлено при затачивании эльбором. Однако методами электронной микроскопии и спектрального анализа на поверхности пластин обнаружен боридный слой, являющийся продуктом деструкции эльбора круга и химического взаимодействия продуктов его распада с компонентами обрабатываемого материала.

На пластине, заточенной электрокорундовым кругом, на растровом микроскопе обнаружен чистый Al, поиск которого был предпринят на основании данных, полученных при шлифовании стали Р6М5.

Очевидно, Al является продуктом восстановления и деструкции электрокорундового круга (Al_2O_3). Этими исследованиями установлено, что в процессе износа абразивных инструментов на режимах затачивания принимают безусловное участие физико-химические явления и реакции, протекающие на атомно-молекулярном уровне. Они ответственны за появление граничного слоя, принимающего участие как в износе режущего инструмента, засаливании кругов, так и в формировании новой заточенной поверхности [17].

Чтобы ограничить деструкцию круга, а следовательно, и снизить темп его износа, необходимо выяснить механизм этого явления и создать благоприятную контактную обстановку за счет искусственной внешней среды, т. е. СОЖ, а не круга. С этой целью была выполнена серия стойких испытаний эльборовой вставки в разных базовых средах – в воде, масле и аргоне [18].

Испытания показали, что наибольшую стойкость имеет эльбор-Р в среде масла по сравнению с работой в сухую. Нейтральная среда, как и вода, увеличивает темп износа примерно в равной степени [18].

Сравнивая время работы до достижения критерия затупления в воде и аргоне, с одной стороны, и масле, с другой, можно отметить разницу в шесть раз. Вот на что способны СОЖ, действующие по разным механизмам, в частности жидкости, обладающие сильными окислительными свойствами, что увеличивает темп износа эльбора [19].

Метод фотометрии показал наличие после резания с поливом воды окислов бора на площадке износа эльборного зерна. Данный эксперимент подтвердил, что окислительные реакции опасны для эльбора [20].

Этот недостаток эльбора можно устранить применением масла в качестве СОЖ, которое, образуя смазочные пленки и закрывая доступ воздуха из атмосферы, значительно уменьшает темп износа. На заключительном этапе были проведены исследования основных технологических и эксплуатационных параметров – температуры, работоспособности и шероховатости при затачивании стали Р6М5 эльборными кругами на органической, керамической и металлической связках с целью сопоставления их достоинств и недостатков [20].

При затачивании стали Р6М5 всухую круг КРМО16 имеет явное преимущество по работоспособности перед другими, но уступает им по температуре резания, засаливанию и шероховатости обработанной поверхности. Поэтому рекомендовать его для практического применения всухую нет оснований.

Выводы

1. Резкое улучшение всего процесса затачивания существенно повышает износостойкость, практически полностью устраняет прижоги и засаливание кругов на металлической связке, повышает качество режущего инструмента из быстрорежущих сталей и производительность операций шлифования и затачивания.

2. Характер и темп износа исследуемых абразивных материалов резко различен:

– электрокорунд изнашивается преимущественно по адгезионно-усталостному механизму с наложением химического;

– алмаз изнашивается по адгезионному механизму с наличием диффузионных процессов;

– эльбор – по химико-абразивному механизму.

Во всех случаях вклад механического разрушения несомненен. Износостойкость электрокорунда примерно в 30 раз ниже синтетического алмаза и всего в 10 раз ниже эльбора.

3. В отличие от большинства исследований процессов контактного взаимодействия ювенильных поверхностей, выполненных в модельных условиях, в данной работе эти же явления изучались непосредственно в

процессе резания. Впервые одновременно исследовались процессы, происходящие на границе контакта и в каждом контртеле в отдельности.

4. Установлено, что сопровождающие операцию затачивания стали Р6М5 данными абразивными материалами физико-химические процессы и реакции, протекающие на атомно-молекулярном уровне, являются ответственными за образование дефектного граничного слоя и приводят к деструкции инструментальных материалов:

- твердый корунд (Al_2O_3) восстанавливается до мягкого Al;
- кубический нитрид бора окисляется до мягкого оксида B_2O_3 ;
- твердый алмаз графитизируется и теряет свои режущие свойства;
- карбид вольфрама, теряя углерод, становится мягким W.

Одновременно образуются новые структуры – сложные карбиды $(Cr, Fe, Mo, W)_{23}C_6$, W_2C , MO_2C и сложные окислы $CoFeO_4$, WO_2 , WO_3 .

5. Установленная идентичность вторичных структур, образующихся на границе раздела инструментального и обрабатываемого материалов в разных процессах резания (точение, микрорезание, затачивание, шлифование), свидетельствует об универсальности и закономерности этих явлений.

6. При затачивании быстрорежущей стали всегда возникает граничный слой тех или иных размеров и строения, который, как правило, является дефектным, снижая качество режущего инструмента. Он же участвует в процессе засаливания абразивных кругов, уменьшая их работоспособность.

7. Граничный слой, образующийся при резании кругами из эльбора, состоит из окислов бора и боридов. Окислы бора являются смазочным материалом, а бориды – барьерами против переконцентрации углерода в заточенном инструменте. Этот слой можно считать естественно оптимизированным и обуславливающим благоприятную контактную обстановку. Однако он образуется за счет деструкции круга, что является одной из причин его износа.

8. Выпускаемые серийно и применяемые в промышленных масштабах эльборовые круги на керамической и органической связках при затачивании быстрорежущих сталей имеют сравнительно низкую работоспособность и нуждаются при работе всухую в периодической правке.

9. Наилучшие результаты по работоспособности (0,4 мг/г) получены на эльборовых кругах с металлической связкой (КРМО16) при поливе индустриальным маслом ИС-12.

10. Резцы, заточенные кругами КРМО16, оказались наиболее качественными, их стойкость повысилась на 30...40 % по сравнению с резцами, заточенными кругами КОК19 и КОСБ8.

Литература

1. Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали: справочник. В 3 т./ под. ред.

М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. М.: Машиностроение, 1983. 352 с.

2. Попилов Л.Я., Зайцев Л.П. Электрополирование и электроотравление металлографических шлифов. М.: Металлургия, 1963. 410 с.

3. Лазаренко Б.Р. Электрические способы обработки металлов и их применение в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 40 с.

4. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Комарова Г.П. Закономерности образования измененного поверхностного слоя при электроискровом легировании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 4. С. 20-28.

5. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189-190.

6. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749, Рос. Федерация. 2001116429; заявл. 13.06.01; опубл. 20.08.03, Бюл. № 23.

7. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 22115641. Рос. Федерация. № 2001116428; заявл. 13.06.01; опубл. 10.11.03, Бюл. № 31.

8. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Лосев Е.Д., Яковец А.В., Черемных А.С. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке: пат. 2446039. Рос. Федерация. №2010111574; заявл. 25.03.10; опубл. 27.03.12., Бюл. № 9.

9. Янюшкин А.С., Ереско С.П., Лобанов Д.В., Сурьев А.А., Кузнецов А.М. Устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга: пат. 2239525. Рос. Федерация. № 2003105413/02; заявл. 25.02.03; опубл. 10.11.04, Бюл. № 31.

10. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов. СТИН. 2010. № 11. С.2-4.

11. Суперсплавы. В 2 кн. Кн. 2: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / под ред. Ч.Т. Симса. М.: Металлургия, 1995. 384 с.

12. Рипан Р. Четяну И. Неорганическая химия (химия металлов). В 2 т. Мир, 1972. Т. 2. 872 с.

13. Tselev A., Luk'yanchuk I.A., Ivanov I.N., Budai J.D., Tischler J.Z., Strelcov E., Kolmakov A., Kalinin S.V. Symmetry Relationship and Strain-Induced Transitions between Insulating M1 and M2 and Metallic R phases of Vanadium Dioxide. Nano Lett, 2010. 10 (11) P. 4409–4416.

14. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка / пер. с венгер. В.П. Романова, Б.В. Климова. М.: Металлургия, 1982. 312 с.

15. Михалёв О.Н., Янюшкин А.С., Попов А.Ю. Современный подход к автоматизации технологической подготовки производства. [Автоматизация и современные технологии](#). 2011. № 4. С. 39-43.

16. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании: моногр. М., 2004. 230 с.

17. Янюшкин А.С., Лосева Н.Р. Кинетика образования засаленного слоя на алмазных кругах // Физикохимия процесса резания металлов: межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары, 1986. 182 с.

18. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании. [Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки](#). 2012. Т. 1. С. 183-190.

19. Янюшкин А.С., Лосева Н.Р. Современные представления о смазочно-охлаждающих жидкостях, перспективы их

развития и применения // Инструментальное обеспечение автоматизированных систем механообработки: тез. докл. всесоюз. науч. техн. конф. Иркутск, 1990. 147 с.

20. Янышкин А.С., Попов В.Ю. Поверхность алмазного круга после электроалмазного шлифования быстрорежущей стали. [Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки](#). 2002. Т. 2. С. 146-151.

References

1. Bernstein M. L., Рахштадт А.Г. Physical metallurg and a heat treatment became: quick reference. In 3 t. Under. edition M.L. Bernstein, A.G. Rakhshadt. M.: Machine industry, 1983. 352 p.

2. Popilov L. Ya., Zaitsev L.P. Electropolishing and electroetching metallographic sections. M.: Metallurgy. 1963. 410 p.

3. Lazarenko B.R. Electrical methods of processing metals and their application in engineering. M.: Machine building, 1978. 40 p.

4. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D., Komarova G.P. // Regularities of the modified surface layer of electro-spark alloying. Hardening and coating technology. 2008. № 4. P. 20-28.

5. Yanyushkin A.S., Popov V.Y., Yanyushkin R.A. Elements of the modernization of machines grinding group under treatment processes electric diamond grinding // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri. 2000. T. 1. P. 189-190.

6. Yanyushkin A.S., Popov V.Y., Suryv A.A., Yanpolskiy V.V. Strain gauge insert for measuring small forces in electric diamond grinding / Industrial patent 2210749. Rus. Federation; stat. 13.06.01; № application 2001116429, post. 20.08.2003. Bul. № 23.

7. Yanyushkin A.S., Popov V.Y., Suryv A.A., Yanpolskiy V.V. Means for measuring small forces in electric diamond grinding / Industrial patent 22115641. Rus. Federation; stat. 13.06.01; № application 2001116428, post. 10.11.2003. Bul. № 31.

8. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A., Popov V.Y., Suryv A.A., Arkhipov P.V., Losev E.D., Yakovets A.V., Cheremnih A.S. Cathode design for wheel dressing in combined electric diamond grinding / Industrial patent 2446039. Rus. Federation; stat. 25.03.10; № application 2010111574, post. 27.03.2012. Bul. № 9.

9. Yanyushkin A.S., Eresko S.P., Lobanov D.V., Suryv A.A., Kuznetsov A.M. A device for combined electric diamond grind-

ing with continuous wheel dressing / Industrial patent 2239525 C1. Rus. Federation; stat. 25.02.03; № application 2003105413/02, post. 10.11.2004.

10. Lobanov D. V., Yanyushkin A.S., Rychkov D. A. Architecture of a toolhouse economy when handling composite materials. STIN. 2010. № 11. P. 2-4.

11. Superalloys II: Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants / Under Ed. Sims Ch.T. et al: Trans. from English. In 2 books. Book 2. / Ed. Shalin R.E. M.: Metallurgy, 1995. 384 p.

12. Ripan R., Chetyanu I. Inorganic chemistry (chemistry of metals). In 2 vols. Vol. 2. M.: Mir, 1972. 872 p.

13. A. Tselev, I.A. Luk'yanchuk, I.N. Ivanov, J.D. Budai, J.Z. Tischler, E. Strelcov, A. Kolmakov, and S.V. Kalinin. Symmetry Relationship and Strain-Induced Transitions between Insulating M1 and M2 and Metallic R phases of Vanadium Dioxide. Nano Lett., 2010, 10 (11), P. 4409–4416.

14. Artinger I. Tool steels and heat treatment / Translated from the Hungarian V.P. Romanov and B.V. Klimov. Ed. Senior doctorates L.S. Kremnev. M.: Metallurgy, 1982. 312 p.

15. Mikhalev O. N., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Modern an approach to automation of technological opening-up of manufacture. Automation and current technologies. 2011. № 4. P. 39-43.

16. Yanyushkin A.S., Shorkin V.S. Contact processes at electro-diamond grinding: monograph. M.: 2004. 230 p.

17. Yanyushkin A.S., Loseva N.R. Kinetics of formation of a greasy layer on the diamond wheels. Physical chemistry of metal-cutting process. Between college sat. science works. Cheboksary, 1986. 182 p.

18. Yanyushkin A.S., Medvedev O. I., Yanyushkin S. A., Popov V.Yu. Physico-chemical interaction of toolhouse and treated materials at the combined electrochemical grind. Works of Brotherly state university. Ser. Natural and engineering sciences. 2012. T. 1. P. 183-190.

19. Yanyushkin A.S., Loseva N.R. Modern ideas of cutting fluids, prospects for their development and use. Tool for automated systems of machining. Abstracts proc. NTC. Irkutsk, 1990. 147 p.

20. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Poverkhnost of a diamond circle after electrodiamond grind of a red-hard steel. Works of Brotherly state university. Ser. Natural and engineering sciences. 2002. T. 2. P. 146-151.