

УДК 621.923.6; 621.923.9

Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов

В.Ю. Попов^{1, a}, А.С. Янышкін^{1, b}, А.Ю. Андронов^{2, c}¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия²Донбасская государственная машиностроительная академия, ул. Шкадинова 72, Краматорск, Украина^aberkutoff@rambler.ru, ^byanyushkin@brstu.ru, ^caandronov@list.ru

Статья поступила 14.12.2013, принята 17.02.2014

Комбинированные методы обработки, такие, как электрохимическая и электроэрозионная обработка, широко используются во многих отраслях машиностроения. Они применяются при изготовлении сложных деталей в машиностроительной, автомобильной, инструментальной, аэрокосмической промышленности; при обработке сложнопрофильных и ответственных поверхностей деталей машин, изготовленных из сверхтвердых и композиционных материалов. В большинстве случаев применение этих методов экономически оправдано, несмотря на большие энергетические и финансовые затраты, поскольку не все процессы обычной механической обработки могут осуществлять бездефектное резание металлов, отвечающее современным требованиям к деталям по точности, качеству, безопасности и т. п. Следует отметить, что серьезной проблемой, с которой столкнулись исследователи, оказался вопрос потери работоспособности абразивного инструмента из-за засаливания их рабочей поверхности. Более того, любой абразивный инструмент неизбежно засаливается после определенного периода обработки. Однако в большей части это относится к алмазным шлифовальным кругам на металлической связке.

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

Results of a comprehensive study of a loading layer of diamond wheels

V.Y. Popov^{1, a}, A.S. Yanyushkin^{1, b}, A.Yu. Andronov^{2, c}¹Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia²Donbass State Engineering Academy; 72 Shkadina St., Kramatorsk, Ukraine^aberkutoff@rambler.ru, ^byanyushkin@brstu.ru, ^caandronov@list.ru

Received 14.12.2013, accepted 17.02.2014

The combined methods of working, such as electrochemical and electro-erosion machining, are used widely in many branches of machine building. They adapt with the production of complex-shape parts in the machine-building, motor vehicle, tool, aerospace industry; with the treatment of the complex-profile and critical surfaces of the machine parts of those prepared from the super-hard and composite materials. In the overwhelming majority of the cases the application of these methods is economically justified, since not all processes of usual mechanical processing can achieve the faultless cutting of metals, which corresponds to contemporary requirements for the components on the accuracy, to quality, safety and the like often this connected with the enormous power and financial expenditures. It should be noted that the serious problem, which encountered the researchers, proved to be a question of the loss of the fitness for work of abrasive tool because of loading of their working surface. Moreover, any abrasive tool unavoidably soils after the definite period of working. However, in the larger part this related to the diamond grinding wheels on the metallic bond.

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

Введение. При обработке высокотвердых материалов, инструментальных и наноструктурных материалов [3, 4], в процессе затачивания металлорежущего инструмента или шлифования ответственных поверхностей деталей машин практически не применяют алмазные шлифовальные круги (АШК) на металлической связке. В первую очередь это связано с интенсивным засаливанием шлифовального круга, и, как следствие, потерей его режущей способности, что влечет за собой появление на обрабатываемой поверхности разнообразных дефектов в виде прижогов, макро- и микротрещин, изменения структуры поверхностных слоев и т. п. Од-

нако экспериментальные исследования, проведенные авторами, однозначно доказывают: если создать соответствующие специфические и, главное, недорогие в эксплуатации условия, то алмаз и алмазные инструменты при такой обработке показывают высокие режущие способности [3, 4]. Было доказано, что в процессе обработки образуется граница контакта, которая одновременно принадлежит инструментальному и обрабатываемому материалам [5 – 9]. Протекающие здесь контактные процессы и реакции ответственны как за засаливание круга, так и за образование дефектного слоя и работоспособность инструмента в целом.

Методика проведения исследований контактирующих поверхностей. Все исследования проводились на операции шлифования, на универсально-заточных станках моделей 3Д642Е и 3Е642Е, модернизированных [10 – 14] под процессы комбинированной электрохимической обработки (КЭАО). Материал исследуемых образцов – закаленная быстрорежущая сталь, марки Р6М5.

Исследования были разбиты на два этапа. Целью первого было получение с поверхности АШК информации о химическом составе засаленного слоя, образующегося в процессе обработки. Анализ показывает, что при абразивной обработке постоянно возникает граница взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов. Эта граница является неизбежным и постоянным спутником резания, она формируется из компонентов взаимодействующих тел, находящихся в условиях высоких контактных энергий.

Образование на рабочей поверхности круга засаленного слоя анализировалось при помощи многоцелевого растрового электронного микроскопа исследовательского класса Carl Zeiss EVO[®]50 XVP. Рентгеновский энергодисперсионный анализ химического состава засаленного слоя определялся с помощью встроенного в микроскоп химического анализатора EDSx-Act (Oxford Instruments). Определение параметров топографии поверхности образцов проводилось средствами оптической интерферометрии на оптическом интерферометре Zygo NewView[™]7300.

Целью второго этапа являлся анализ фазового состава и причин образования засаленного слоя, включая нахождение технологических путей его нейтрализации и поддержания работы круга в режиме самозатачивания. Определение фазового состава образцов в засаленной области осуществлялось с помощью рентгеноструктурного анализа на порошковом рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific).

Экспериментальные исследования качества поверхности АШК. Реализация цели первого этапа показала, что при шлифовании инструментальной стали Р6М5 без применения СОЖ ($V = 35$ м/с; $S = 1,5$ м/мин; $t = 0,03$ мм/дв.ход) режущая поверхность круга почти полностью покрыта засаленным слоем (рис. 1). Кроме того, видны царапины от абразивного взаимодействия контактирующих пар. Над засаленным слоем выступают вершины отдельных алмазных зерен, которые в силу этого работают непродолжительное время, а затем изнашиваются до его уровня. Участки алмазоносной поверхности, свободные от засаливания, находятся ниже и в работе не участвуют (рис. 2). Результаты растровой электронной микроскопии данной поверхности подтверждают сделанные выводы. Наибольший пик принадлежит железу, основному компоненту обрабатываемого материала, быстрорежущей стали Р6М5. Линии, принадлежащие связке круга – олово, медь, кремний, алюминий – перекрываются компонентами обрабатываемого материала – железом и марганцем.

Установлено, что засаленный слой имеет сложную механохимическую природу и состоит из компонентов обрабатываемого материала, связки круга, внешней среды и вторичных соединений, образовавшихся в ре-

зультате адгезионно-диффузионных явлений и химических реакций. Это также подтверждают следующие данные, полученные с этих же образцов при рентгеноструктурном анализе.

Дифракционные картины образцов зарегистрированы на θ - θ дифрактометре с использованием медной рентгеновской трубки в качестве источника рентгеновского излучения. Излучение не монохроматизировалось и регистрировалось энергодисперсионным Si(Li) детектором, настроенным на регистрацию $\text{CuK}\alpha_{1/2}$ длин волн. Пучок падающих на образцы лучей имел прямоугольное поперечное сечение, размеры которого, а также угол расходимости пучка изменяли с помощью ряда щелей и коллиматора Соллера. Дифрагированное излучение так же коллимировали с помощью ряда щелей и коллиматора Соллера. Размеры облучаемой области на каждом образце составляли $\approx 5 \times 12$ мм. Рентгенограммы были получены непосредственно с поверхности предоставленных образцов, без предварительной обработки поверхности. Картины регистрировали в режиме времени ($t = 5$ сек.) с шагом $\Delta 2\theta = 0,050$.

Дифракционная картина образца шлифовального круга характеризуется значительным количеством слабых отражений, что характерно для веществ неорганических, содержащих в себе существенное число различных фаз. Увеличение фона с ростом угла сканирования предположительно связано с малыми размерами образца. Кроме того, низкое качество дифракционных картин при статистической точности 5 сек. позволяет предположить высокую концентрацию кристаллических дефектов в присутствующих фазах образца (рис. 3).

Перед расшифровкой снятых с поверхностей образцов рентгенограмм был проведен их спектральный анализ (рис. 1). Согласно данным химического анализа в образцах присутствуют элементы: Fe, Al, Cu, Zn, Mg, O, C.

С большой долей вероятности удалось обнаружить фазу Al_2Cu , все теоретические дифракционные отражения которой имеют соответствие по положению и интенсивности на рентгенограмме (рис. 3).

На основании химического анализа образцов было проведено сравнение положений дифракционных пиков экспериментальной рентгенограммы с теоретическими положениями рефлексов всех фаз, содержащих Fe, Al, Cu, Zn, Mg, O, C. Было выдвинуто предположение, что образец содержит: α – железо, FeO, ZnO, твердый раствор цинка в меди, Cu_2O , Cu_5Zn_8 . Однако для полной идентификации данных фаз необходимы дополнительные исследования, так как на рентгенограмме установлено присутствие только наиболее сильных рефлексов анализируемых фаз.

Формирование поверхностного слоя при КЭАО определяется механизмом работы режущих зерен круга, уровнем развивающихся в зоне шлифования сил резания и температуры в зоне контакта, физико-химическим взаимодействием алмаза с обрабатываемым материалом, а также воздействием на него связки круга и плотности тока. Влияние всех этих факторов тесно связано друг с другом, и выделить самостоятельное действие какого-либо из них весьма сложно.

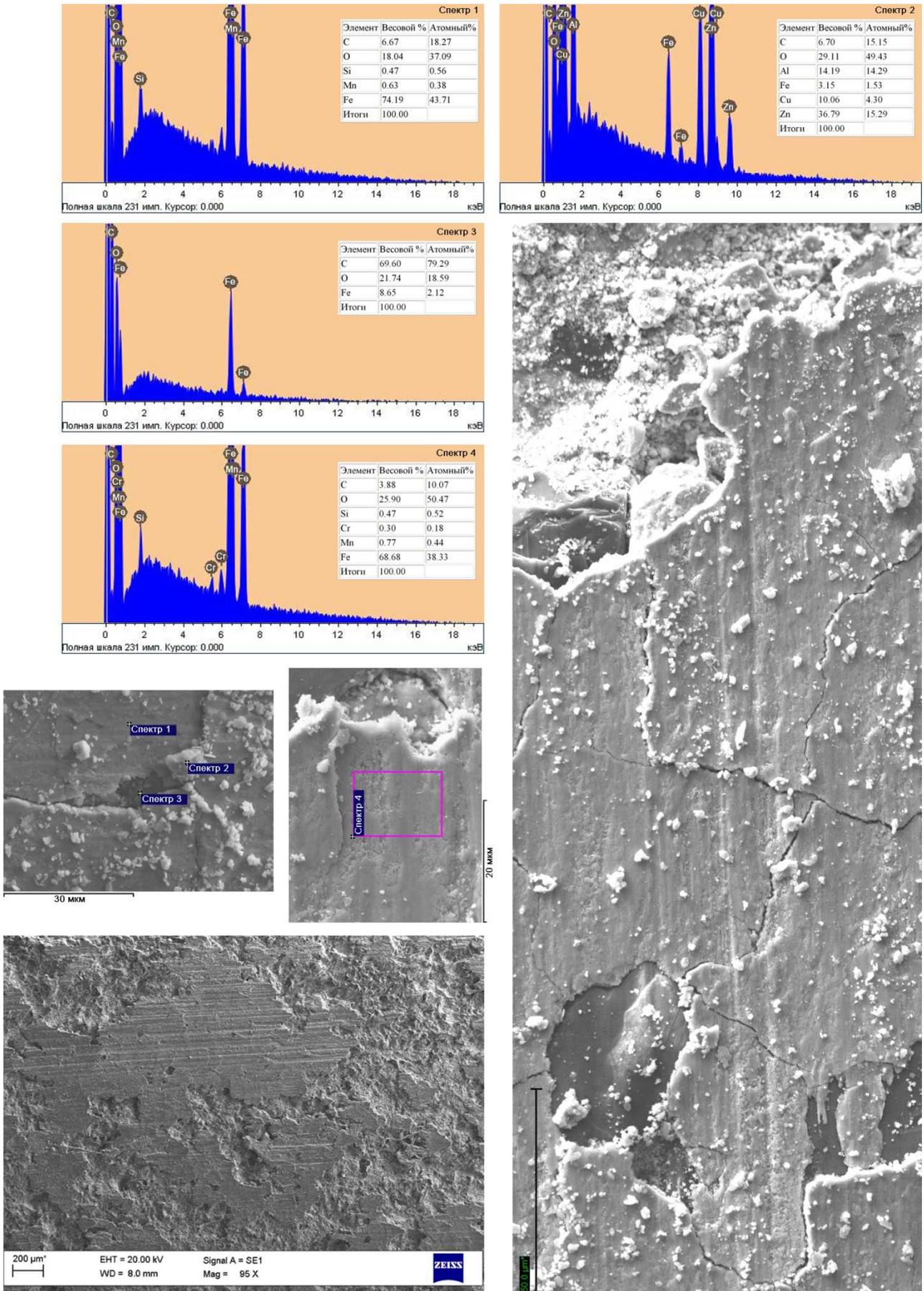


Рис. 1. Засаленная поверхность круга АСВ 80/63 МО13 – 100 % со спектральным анализом его химического состава

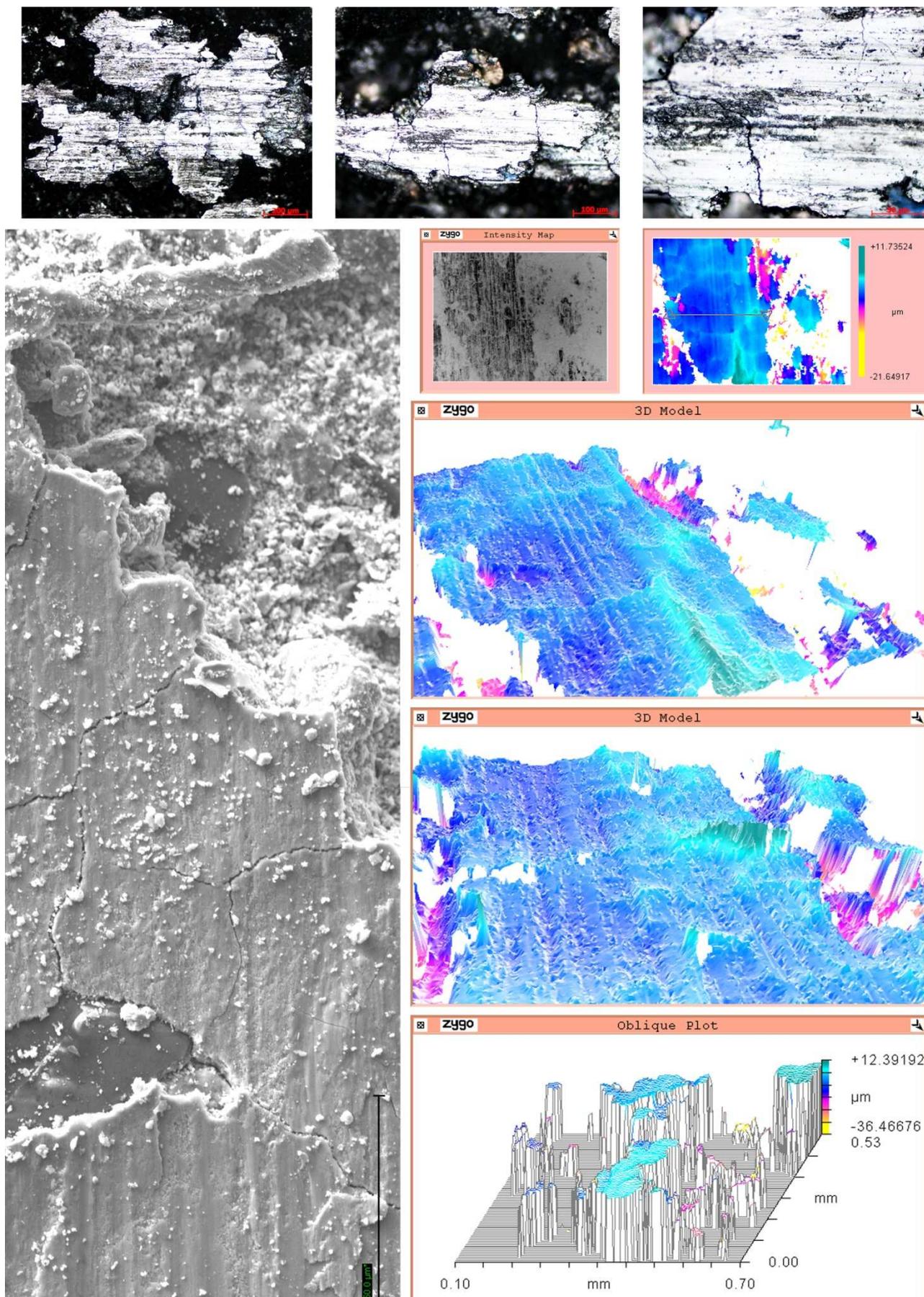


Рис. 2. Топография засаленной поверхности круга AC6 80/63 – 100 % MO13

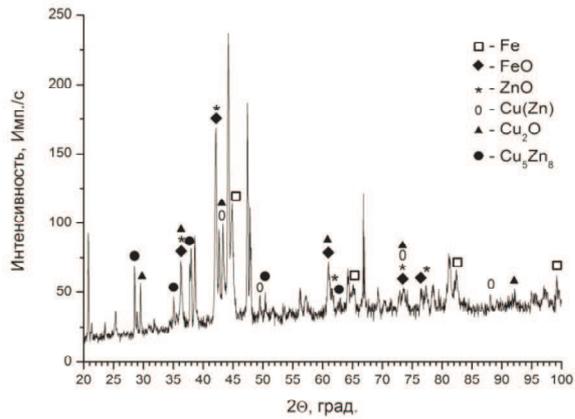


Рис. 3. Общий вид и анализ дифракционной картины анализируемого образца с поверхности круга АС6 80/63 – 100 % М013 после КЭАО инструментальной стали Р6М5

Однако известно [7, 9], что перечисленные факторы, в зависимости от условий шлифования, обуславливают изнашивание алмазного круга и могут проявляться в одном из пяти видов или их сочетании (рис. 4). Также известно, что удельный расход алмазов является одним из самых важных показателей процесса шлифования, так как непосредственно влияет на стоимость обработки. Отсюда вытекает актуальность исследований, проводимых в направлении изыскания таких условий и режимов обработки, при которых удельный расход алмазов был бы минимален. Необходимо стремиться к тому, чтобы научно установить и впоследствии применять в производственных условиях такие режимы, которые способствовали бы наименьшему износу круга и наибольшему сошлифовыванию материала без потери качества обрабатываемой поверхности.

<p>20 μm Преобладающее самозатачивание: вырывание абразивных зёрен с разрушением мостиков связи или объёмное разрушение зерна по нескольким поверхностям</p>	<p>x800 Отсутствие белой карбидной полосы: область применения ограничена черновым шлифованием стали</p>
<p>10 μm Частичное самозатачивание и частичное затупление: микроразрушение кромок зёрен, их выкрашивание</p>	<p>x800 Эталонная поверхность: величина дефекта поверхностного слоя минимальна, просматриваются зёрна мартенсита и карбидов</p>
<p>40 μm Преобладающее затупление: истирание вершин зёрен с образованием площадок износа</p>	<p>x800 Наличие карбидной неоднородности: на тёмном фоне заметны светлые карбиды что способствует выкрашиванию режущих кромок в процессе работы</p>
<p>10 μm Частичное затупление и частичное засаливание: налипание обрабатываемого материала на вершины зёрен с образованием площадок износа</p>	<p>x800 Рост отдельных карбидных зёрен: дефектный слой в виде светлой полосы с вкраплениями карбидов вдоль всей режущей кромки</p>
<p>20 μm Преобладающее засаливание: заполнение впадин обрабатываемым материалом и продуктами износа</p>	<p>x800 Наибольший рост зёрен: особо крупные карбидные зёрна наблюдаются вблизи кромки, что является прямым признаком обезуглероживания поверхности</p>
<p>Рис. 4. Виды износа алмазных кругов</p>	<p>Рис. 5. Изменение структуры быстрорежущей стали в зависимости от вида износа алмазных кругов</p>

Алмазные круги на металлических связках имеют свои особенности работы и износа, обусловленные тем, что они изготавливаются из более прочных алмазов, которые закрепляются в износостойкой и прочной связке. Вначале изнашиваются наиболее выступающие над поверхностью режущие кромки, затем площадки износа наблюдаются одновременно на нескольких режущих кромках одного и того же зерна. На притупившиеся алмазные зерна начинают действовать повышенные на-

грузки, в результате чего зерна частично скалываются, либо разрушаются. Так как разрушенное алмазное зерно образует значительное число режущих кромок, то это положительно влияет на весь процесс шлифования.

Экспериментальные исследования качества обработанной поверхности. На рис. 5 показано, как изменяется структура быстрорежущей стали в зависимости от вида износа алмазных шлифовальных кругов, образующегося при комбинированной электроалмазной об

работке. Установлено, что при шлифовании быстрорежущих сталей алмазными кругами возникают такие условия в зоне контакта, включая высокие значения локальной температуры, которые ведут к повторной закалке без предварительного отжига. При образовании аустенитной структуры объемные изменения вызывают ее пластическую деформацию и наклеп. Последующая рекристаллизация, происходящая при высокой температуре и связанная с состоянием карбидных частичек, может сопровождаться ростом зерна [3, 4].

Выводы

На стадии исследования внешней картины алмазнослойной поверхности шлифовальных кругов и дефектного слоя заточенных изделий проявились преимущества КЭАО. Круг имеет развитый рельеф режущей поверхности, а засаливание практически отсутствует, о чем говорит равная вскрытость режущих зерен. Если же рассматривать обычное алмазное шлифование инструментальных материалов алмазными кругами, то в данном случае происходит постепенное засаливание круга.

Однако, 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, цинк 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 возникают при интенсификации режимов шлифования, когда не только локальные, но и средние температуры в зоне контакта достигают высоких значений (более 1000 °С).

Для исключения подобных негативных процессов, возникающих при алмазной обработке железоуглеродистых материалов, в том числе ВТМ и наноструктурных, следует, в первую очередь, создать наиболее благоприятные условия для алмазного инструмента, обеспечить ему условия, при которых абразивный круг работал бы в режиме самозатачивания. Достичь этой цели можно, управляя электрическими характеристиками обработки, «подобрав» оптимальные режимы плотности тока правки и травления. Практика показывает, что режим устойчивого самозатачивания наиболее полностью реализуется в условиях непрерывной электрохимической правки круга и одновременного травления (анодного растворения) обрабатываемой поверхности и характеризуется постоянством радиальной составляющей силы P_u и мощности резания. В качестве научного и производственного результата мы получаем преимущество комбинированной обработки перед простыми методами электроалмазного шлифования по важнейшим параметрам: величине дефектного слоя и качеству изготавливаемых изделий; удельному расходу алмазов и режущей способности.

Поэтому рекомендуется использовать данную технологию в различных отраслях промышленности для шлифования и затачивания самых разнообразных ин-

струментов [15]: резцов, фрез, зенкеров, сверл, ответственных изделий машиностроения и т. д. При этом требуется несложная модернизация оборудования, которая осуществима практически на всех видах заточных и шлифовальных станков, а также возможно создание нового вида оборудования с более широкими технологическими характеристиками.

Литература

1. Янюшкин А.С., Якимов С.А., Лобанов Д.В. Состояние твердотельного инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки // Вестн. Иркут. регион. отд-ния Акад. наук высш. шк. Рос. Федерации. 2006. № 2. С. 100-104.
2. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146-149.
3. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Васильев Е.В., Попов А.Ю. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: моногр. Братск: БрГУ, 2009. 228 с.
4. Попов В.Ю. Повышение качества изделий из инструментальных сталей при электроалмазном шлифовании: дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2002. 159 с.
5. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестн. машиностроения. 2009. № 3. С. 62-69.
6. Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Поверхность алмазного круга после электроалмазного шлифования быстрорежущей стали // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2002. Т. 2. С. 146-151.
7. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Исследование поверхности алмазных кругов после комбинированной электроалмазной обработки быстрорежущей стали // Технология машиностроения. 2013. № 11. С. 26-30.
8. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механика XXI века. 2010. № 9. С. 101-104.
9. 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. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. С. 183-190.
10. 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.
11. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янюшкин В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116429, опубл. 20.08.2003.
12. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янюшкин В.В. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 22115641. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116428, опубл. 10.11.2003.
13. 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; заявл. 25.03.10; № заявки 2010111574, опубл. 27.03.2012.
14. 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 С1. Рос. Федерация; заявл. 25.02.03; № заявки 2003105413/02, опубл. 10.11.2004.
15. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31, № 2. С. 156-157.

References

1. Yanyushkin A.S., Yakimov S.A., Lobanov D.V. Solid state instrument, sharpened by various methods of electric diamond grinding // Vestn.

Irkut. region. otd-nija Akad. nauk vyssh. shk. Ros. Federacii. 2006. № 2. P. 100-104.

2. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Petrov N.P., Rychkov D.A. Increasing efficiency in the processing of high-composite materials // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. Vol. 1. P. 146-149.

3. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Vasilev E.V., Popov A.Yu. Combined electric diamond grinding of the tool steel // Bratsk, BrGU, 2009, 228 p.

4. Popov V.Yu. Improving the quality of products of tool steel in electric diamond grinding // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science. Bratsk, 2002. 159 p.

5. Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V., Toropov V.A. Mechanism of loading process of grinding wheels // Vestn. mashinostroenija. 2009. № 3. P. 62-69.

6. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Diamond wheel surface after electric diamond grinding of high-speed steel // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2002. Vol. 2. P. 146-151.

7. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Study of the surface of diamond wheels after combined electric diamond grinding of the tool steel // Tehnologija mashinostroenija. 2013. № 11. P. 26-30.

8. Popov V.Yu., Bolshakov I.M., Guglin G.S., Rasputin E.V. Study of loading process of diamond grinding wheels for metal bond in the processing high-speed steel R6M5 // Mehaniki XXI veku. 2010. № 9. P. 101-104.

9. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Yanyushkin S.A., Popov V.Yu. Physical-chemical interaction of the tool and the processed materials under combined electrochemical grinding // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2012, P. 183-190.

10. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Yanyushkin R.A. Elements of the modernization of grinding machines for the processes of electric diamond grinding // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2000. Vol. 1. P. 189-190.

11. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Suriev A.A., Yanpolskiy V.V. Strain-gage installation for measuring small forces in electric diamond grinding: pat. 2210749. Rus. Federation; decl. 13.06.01; № 2001116429, publ. 20.08.2003.

12. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Suriev A.A., Yanpolskiy V.V. A device for measuring small forces in electric diamond grinding: pat. 22115641. Rus. Federation; decl. 13.06.01; № 2001116428; publ. 10.11.2003.

13. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A., Popov V.Yu., Suriev A.A., Arkhipov P.V., Losev E.D., Yakovets A.V., Cheremnih A.S. Cathode design for wheel dressing in combined electric diamond grinding: pat. 2446039. Rus. Federation; decl. 25.03.10; № 2010111574; publ. 27.03.2012.

14. Yanyushkin A.S., Eresko S.P., Lobanov D.V., Suriev A.A., Kuznetsov A.M. A device for combined electric diamond grinding with continuous wheel dressing: pat. 2239525 C1. Rus. Federation; decl. 25.02.03; № 2003105413/02; publ. 10.11.2004.

15. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. № 2. P. 156-157.

УДК 621.357

Исследование процесса хромирования с добавками ионов металлов

Б.Н. Михайлов^a, Р.В. Михайлов^b

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^abornik39@mail.ru, ^bromanirk2009@mail.ru

Статья поступила 07.12.2013, принята 09.02.2014

Исследован процесс хромирования из электролитов на основе соединений Cr^{6+} с добавками ионов металлов, рекомендуемый для использования на предприятиях машино-, автомобиле- и приборостроения. Определена зависимость основных технологических показателей – выхода по току и рассеивающей способности электролита от его температуры, концентрации добавки и катодной плотности тока с использованием потенциостата «ПИ-50-1» в гальваностатическом режиме, пятисекционной ячейки Хулла и гравиметрического метода. Определена зависимость микротвердости, маслоемкости и величины внутренних напряжений хромовых покрытий от технологических параметров процесса электроосаждения. Показана высокая износостойкость покрытий из данных электролитов. Рекомендуемые нами электролиты более «чисты» в экологическом плане, т. к. обеспечивают снижение выноса Cr^{6+} в атмосферу по сравнению с универсальным электролитом хромирования вследствие более высокого выхода по току и пониженной температуры электролиза. Их использование обеспечивает ресурсосбережение дефицитного хрома и снижение удельного расхода электроэнергии.

Ключевые слова: электроосаждение, хром, покрытия, характеристики, гравиметрия.

Research of chrome-plating process with addition of metal ions

B.N. Mikhailov^a, R.V. Mikhailov^b

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia

^abornik39@mail.ru, ^bromanirk2009@mail.ru

Received 07.12.2013, accepted 09.02.2014