

**Vjacheslav Y. Popov,**  
ScD, associate professor;

**Alexander S. Yanyushkin,**  
ScD, (Technical Science), Professor;  
Bratsk State University

## **Adhesion-Diffusion Interaction of Contact Surfaces with the Treatment Diamond Grinding Wheels**

**Keywords:** *High speed steels, Grinding, Diamond wheels, Metal bonds.*

**Annotation:** *The questions of the practical application of the combined electric diamond grinding are examined in the article. Experiments were conducted on the operation of grinding tool materials with diamond grinding wheels on metal bond. In the represented part of the work, the action, diffusion and adhesive phenomena of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels, taking into account temperature factor.*

### **1. Введение.**

На сегодняшний день существуют технологии (3,5,10), способные объединить в себе возможность рационального и высокоэффективного применения алмазного инструмента на операциях шлифования современных материалов. Поэтому грамотный выбор и назначение прогрессивных методов обработки является одним из направлений технического прогресса в машиностроении. Перспективным методом обработки, позволяющим повысить качество и стойкость металлорежущего инструмента, является комбинированная электроалмазная обработка (КЭАО) (6,16). Данный метод был разработан на кафедре «Технология машиностроения» Братского государственного университета.

Известно, что при затачивании режущих инструментов происходит формирование рабочего поверхностного слоя, ответственного за их качество. В процессе шлифования возникает давление, которое обуславливает появление адгезии в зоне контакта таких разнородных материалов, как круг и обрабатываемый материал. Как правило, следствием этого является последующее протекание диффузионных процессов. Поэтому определение роли адгезионно-диффузионных явлений в процессе резания, а также определение влияния, оказываемое ими на контактирующие поверхности и, как следствие, на качество заточенного инструмента является основной целью данного научного исследования.

Операция затачивания инструмента из быстрорежущих сталей, пожалуй, ещё более ответственна, чем твердосплавного. И не смотря на то, что наиболее высокое качество достигается при их обработке эльборовыми кругами (на керамических и органических связках), но удельный расход абразивного круга, его производительность, - остаются весьма высокими. Выполнение же операции затачивания эльборовыми кругами на металлических связках ведёт к засаливанию их рабочей поверхности (7,8,15). (Засаливание - это непрерывный процесс адгезионно-диффузионного засорения абразивного слоя шлифовального инструмента элементами обрабатываемого материала, влекущий за собой потерю его производительности и режущей способности).

Наиболее производительным является использование не абразивных, а алмазных кругов на металлической связке. Однако и в этом случае, из-за интенсивного засаливания область их эффективного применения весьма ограничена, а сам процесс адгезионно-диффузионного взаимодействия, равно как дефектный слой заточенного инструмента, мало исследован.

Известно, что затачивание режущего инструмента происходит при непосредственном контакте режущей поверхности круга с обрабатываемым материалом и взаимодействии с естественной внешней средой. При этом на границе контакта создаются специфические условия для протекания сложнейших механических, физических, химических процессов и реакций (11,14,17). Можно считать, что одним из главных источников энергий при алмазной обработке является высокая температура. Следует также отметить непосредственное влияние температуры на образование таких дефектов, как микро- и макротрещины, прижоги, остаточные напряжения, изменение структуры поверхностного слоя (1,12). Роль температуры велика и в процессах пластической деформации поверхностного слоя, процессах усиления или ослабления адгезионно-диффузионных и окислительных явлений. Наши исследования показывают, что именно эти процессы и реакции ответственны за формирование рабочего слоя затачиваемого инструмента, т.е. ответственны за его качество, а также за засаливание шлифовального круга. К сожалению, это явление мало исследовано с атомно-молекулярных позиций и поэтому физико-химический аспект процесса засаливания до сих пор остаётся неизвестным.

В то же время механическое вскрытие засаленной поверхности показывает, что алмазные зёрна находятся в удовлетворительном состоянии. Следовательно, круг теряет работоспособность не из-за естественного засаливания, а в связи с тем, что над ними образовался новый слой, препятствующий контакту зёрен с обрабатываемой поверхностью (13).

## **2. Методика исследования контактирующих поверхностей.**

Исследования проводились на операции шлифования, на универсально-заточных станках, моделей 3Д642Е и 3Е642Е (производство России), модернизированных под процессы комбинированной электрохимической обработки. Материал исследуемых образцов – быстрорежущая сталь (БРС), марки Р6М5 и твёрдый сплав ВК8.

В своих исследованиях мы применяли алмазные чашечные круги на металлических связках (производство России): АС6 125/100 МО16 100%, D = 125 мм, b = 10 мм. Эталонная поверхность круга соответствовала поверхности полностью выправленного круга. Приведённые экспериментальные данные получены при 2-х часовом шлифовании без СОЖ пластин твёрдого сплава, с целью получения максимального засаленного слоя.

Структура экспериментальных исследований контактирующих поверхностей была выстроена следующим образом:

- образование на рабочей поверхности круга засаленного слоя анализировалось при помощи многоцелевого растрового электронного микроскопа исследовательского класса Carl Zeiss EVO® 50 XVP (производство Германии);

- рентгеновский энерго-дисперсионный анализ химического состава засаленного слоя определялся с помощью встроенного в микроскоп химического анализатора EDSx-Act (Oxford Instruments);

- измерение температуры в зоне резания производилось методом полу искусственной термопары. В качестве термоэлектрода служила хромелевая проволока диаметром 0,01 мм, заложенная между обрабатываемыми образцами (рис.1), на которые наклеивались слюдяные

прокладки толщиной 0,003...0,005 мм с целью исключения короткого замыкания. Конеч термоэлектрода при обработке размазывался кругом, образуя горячий спай с обрабатываемыми образцами. В качестве регистрирующего прибора использовался самопишущий малоинерционный прибор Н327, с частотой собственных колебаний 100 Гц, что намного превышает частоту колебаний рабочего процесса, который составляет 5...7 Гц.

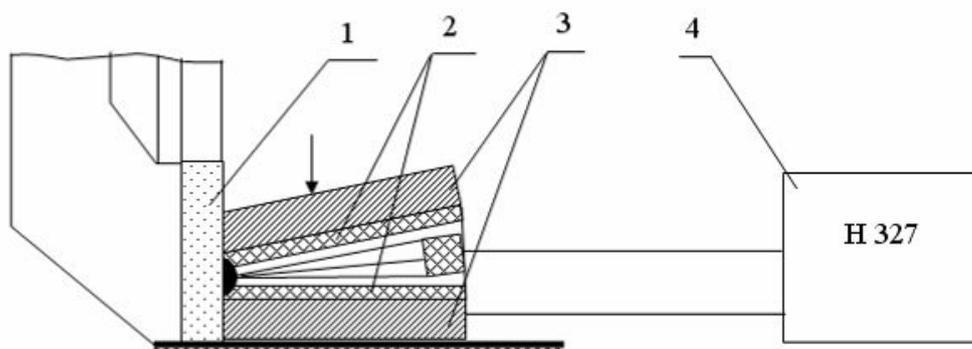


Рис.1. Схема измерения контактной температуры:

- 1 – алмазный круг; 2 – изоляционные прокладки; 3 – исследуемые образцы;  
4 – самопишущий прибор.

### 3. Экспериментальные исследования температурного воздействия.

Поскольку быстрорежущие стали обладают низкой теплопроводностью и быстро нагреваются во время шлифования, высокая температура, выступающая в роли катализатора процессов пластической деформации, образования дефектного слоя и других контактных процессов, способствует образованию трещин вдоль режущей кромки инструмента и её последующему разрушению. Стойкость затачиваемого инструмента будет составлять всего несколько секунд, поэтому закаленную быстрорежущую сталь практически невозможно обрабатывать обычными методами, при которых температура в зоне контакта может достигать 1200°C. При КЭАО температура составляет всего 150°C, что является очень хорошим показателем, поскольку известно (2), что высокая твердость инструмента из быстрорежущей стали сохраняется при нагреве до 500–600°C. В целом затачиваемый инструмент при шлифовании КЭАО остаётся холодным, а тепловая нагрузка воздействует лишь на тонкий поверхностный слой, который удаляется в процессе обработки.

Исследование температуры в зоне контакта осуществлялось при различных методах и режимах шлифования:

- всухую, то есть без использования электролита (СОЖ);
- с использованием электролита;
- КЭАО, с изменением величины тока правки ( $i_{np}$ );
- электроалмазное шлифование (ЭАШ), с изменением величины тока травления ( $i_{tp}$ ).

Экспериментальные данные (рис.2) свидетельствуют, что в зависимости от условий шлифования температура резко изменяется.

Так, например, при работе всухую температура в зоне резания составляет 520°C. Применение в качестве охлаждающей среды стандартного электролита снижает температуру в 2 раза. При КЭАО минимальная температура зарегистрирована при плотности  $i_{np} = 2 \text{ А/см}^2$  и  $i_{tp} = 5 \text{ А/см}^2$ . Она составляет 150°C. Далее при увеличении плотности тока травления до 50 А/см<sup>2</sup> температура возрастает до 640°C. Это повышение объясняется наличием интенсивных электрохимических реакций и, частично, электроэрозией.

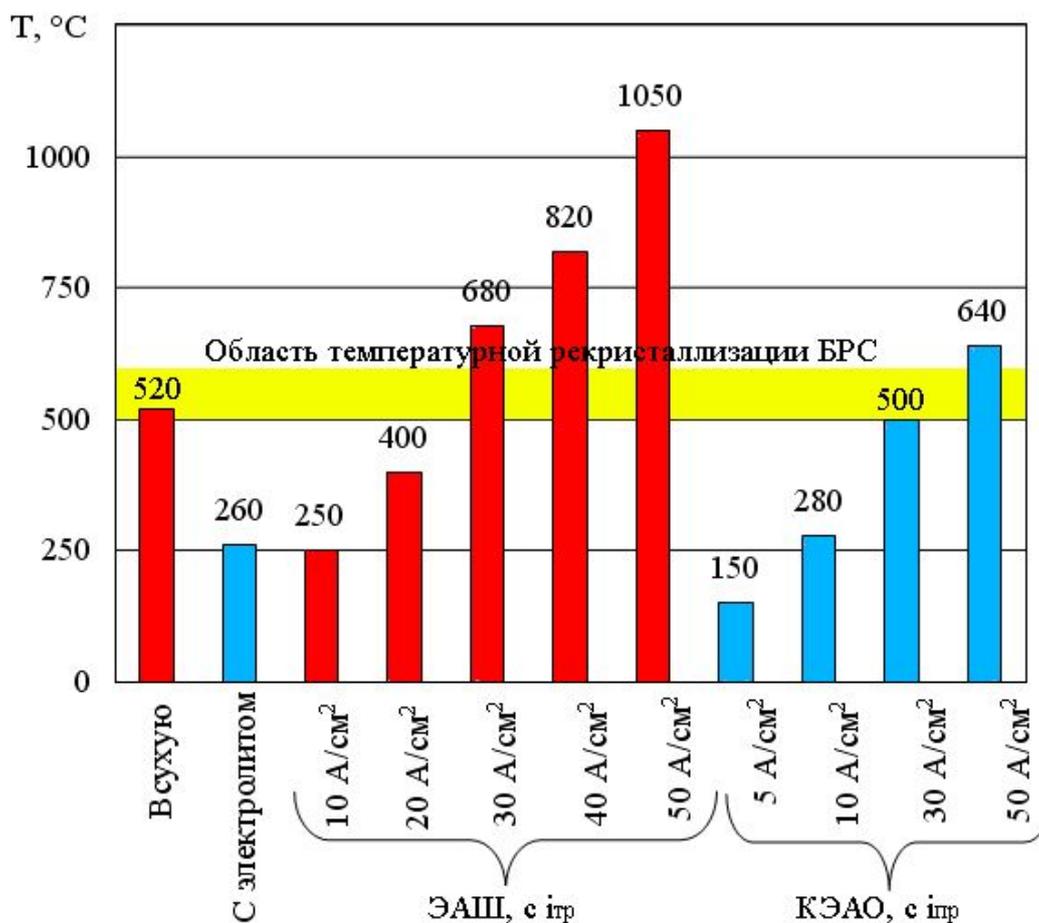


Рис.2. Контактная температура, образующаяся в зоне резания при разных методах шлифования.

Изучение процессов ЭАШ, то есть когда обрабатываемые пластины разупрочняются под действием технологического тока, даёт иную картину. С увеличением  $i_{тр}$  от 10 до 50 A/cm<sup>2</sup> температура в зоне резания повышается более чем в 4 раза (от 250°C до 1050°C). Такое резкое повышение температуры происходит из-за наличия плотного контакта между инструментальной и обрабатываемой поверхностью и трения между ними. Кроме этого, с увеличением плотности тока травления повышаются электроэрозионные процессы, приводящие к оплавлению тонкого поверхностного слоя обрабатываемого материала.

Увеличение режимов резания ведёт к росту тепловыделения, причём самая высокая температура была зафиксирована при работе кругами на металлической связке, самая низкая - на бакелитовой связке, промежуточная - на керамической связке. Жидкости, например, ОСМ-3, НСК-5, И-12А) уменьшают теплонапряжённость, особенно на больших подачах  $t = 0,04$  мм/дв.ход, где температура снижается на 30...50 % и более.

#### 4. Экспериментальные исследования контактирующих поверхностей.

Микрорентгеноспектральные исследования образцов, вырезанных из алмазных кругов на металлических связках, показывают, что засаленный слой состоит из компонентов обрабатываемого материала (твёрдого сплава, державки) и связки круга (рис.3). Установлено присутствие фазы карбида WC, а также выявлено, что часть рентгенограмм относится к совершенно новым соединениям, таким как WO<sub>3</sub>, WO<sub>2</sub> и W<sub>2</sub>C (рис.4).

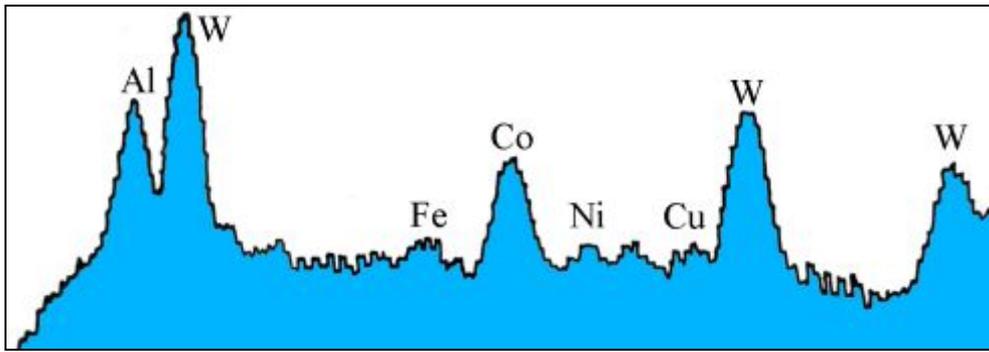


Рис.3. Спектр поверхности круга АСВ 125/100 МО13 100% после затачивания сплава ВК8 без СОЖ: V = 35 м/с; S = 1,5 м/мин; t = 0,03 мм/дв.ход.

Следует заметить, что образование этих соединений свидетельствует о том, что на границе взаимодействия круга с затачиваемым инструментом протекают сложнейшие химические реакции окисления, восстановления и др. Свидетельством чрезвычайно высоких локальных температур является тот факт, что соединение  $W_2C$  образуется нагреванием  $WO_3$  выше  $1500^\circ C$  (9). Тепло, выделяющееся в контактной зоне, являясь следствием ряда протекающих здесь процессов, само становится одним из сильнейших катализаторов контактных процессов. Именно под совокупным влиянием силовых и температурных воздействий плотность, как самого засаженного слоя, так и его связи с поверхностью круга, становится столь велика, что обнаружить границу их раздела чрезвычайно трудно (рис.5). Ясно, что при механическом взаимодействии поверхностей такой монолит образоваться не может.

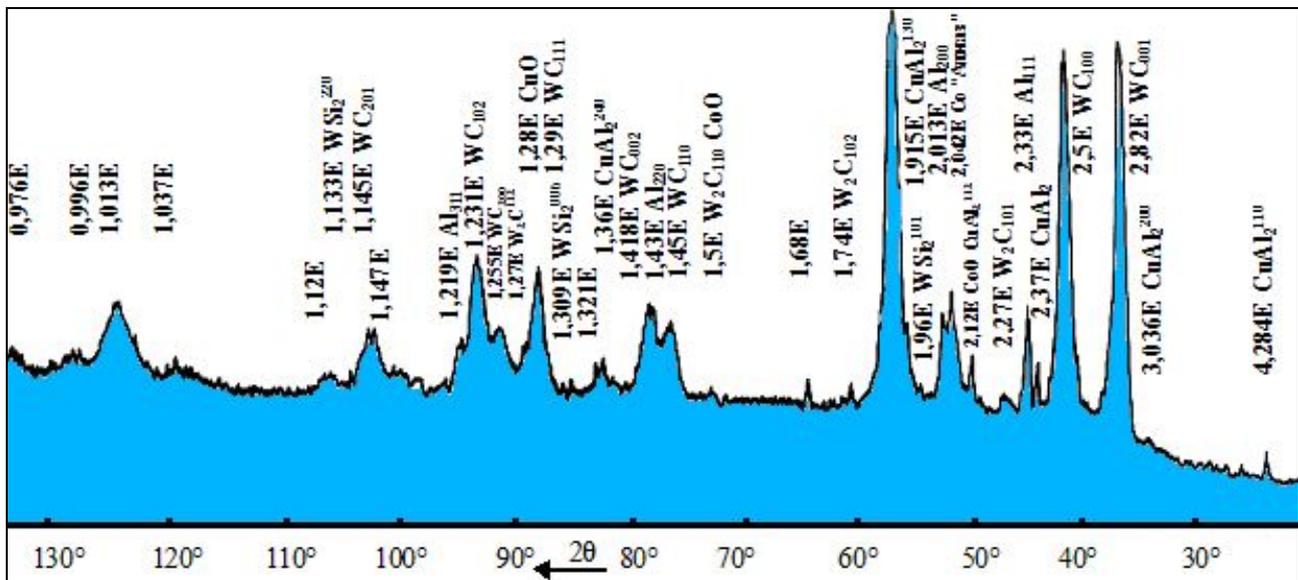


Рис.4. Рентгенограмма поверхности круга АСВ 125/100 МО13 100% после затачивания ВК8 без СОЖ: V = 35 м/с; S = 1,5 м/мин; t = 0,03 мм/дв.ход.

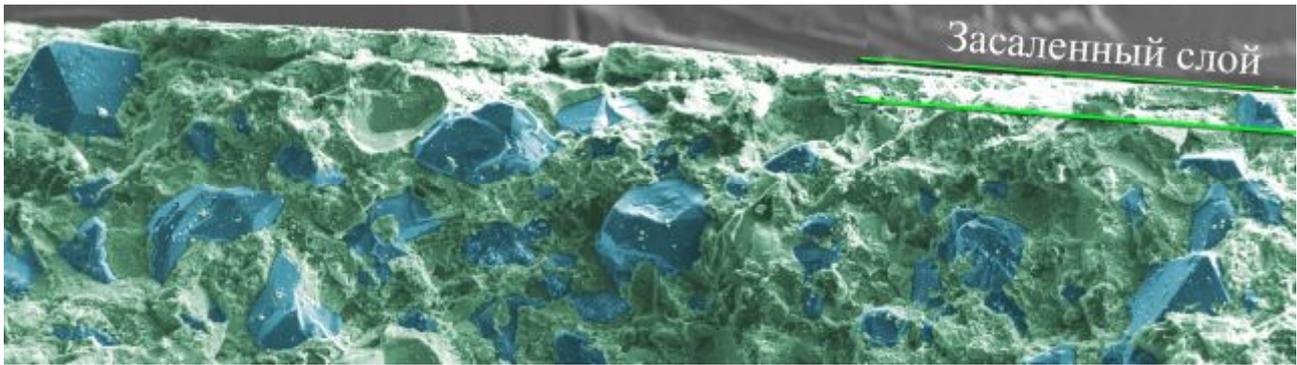


Рис.5. Граница контакта засаленного слоя с поверхностью алмазного круга в поперечном разрезе.

При изучении микроструктуры заточенных образцов быстрорежущей стали Р6М5 на основании статистических данных установлен рост зёрен карбидов на глубине 40...60 мкм от режущей кромки (рис.6). Оказалось, что в опытах, где имеется интенсивное засаливание круга, на заточенном режущем инструменте образуется сплошной дефектный слой протяженностью до 100 мкм, а обнаруженные карбиды отличаются от исходных более крупными (до трёх раз) размерами.

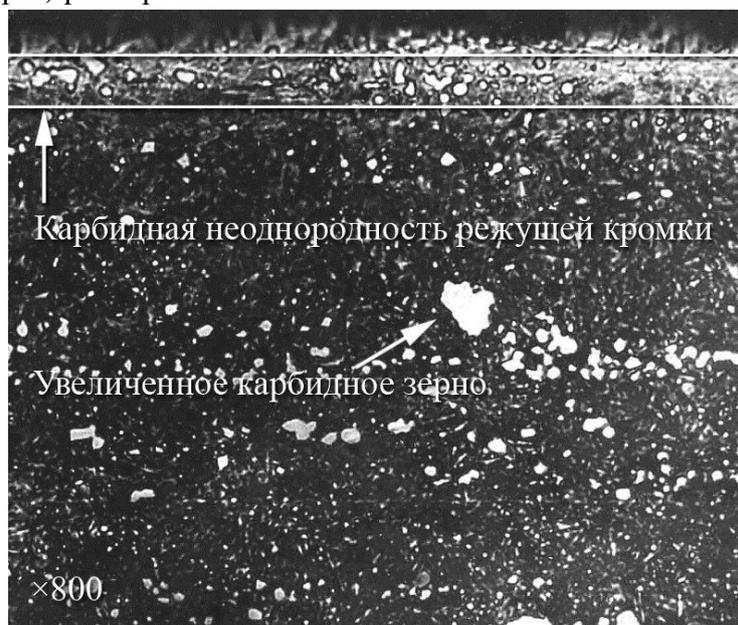


Рис.6. Разрушение режущей кромки инструмента.

Данное явление свидетельствует о вторичной рекристаллизации имеющей место только при температурах, близких к температурам фазовых превращений. Поскольку быстрорежущая сталь обладает низкой теплопроводностью и быстро нагревается во время шлифования, то выступающая в роли катализатора процессов пластической деформации, образования дефектного слоя и других контактных процессов, высокая температура способствует образованию трещин вдоль режущей кромки инструмента и её последующему разрушению.

Кроме роста зёрен карбидов вольфрама на поверхности заточиваемого инструмента идёт его деструкция по схеме  $WC \rightarrow W_2C + C \rightarrow W + C$ . Этот переход в обычных статических условиях возможен только при температуре 2500...2700°C и более. Таким

образом, очевидным является воздействие тепловых процессов на фазовые переходы и образование дефектного слоя.

Рентгеновский энерго-дисперсионный анализ химического состава засаленного слоя показал, что обработка БРС без подключения электрохимических процессов приводит к возникновению диффузии на контактирующих поверхностях и адгезионному схватыванию разнородных материалов. Этому способствуют высокое давление в зоне резания и ван-дер-ваальсовы силы притяжения, действующие при расстояниях между твёрдыми объектами меньше  $\sim 100 \text{ \AA}$  ( $\sim 0.01 \text{ \mu m}$ ). На рис.7 видно, что пики входящих в состав связки круга олова Sn и меди Cu практически отсутствуют или наблюдаются на уровне фона. Образец содержит только пик углерода C, который принадлежит алмазу, и пик кислорода O, позволяющий предположить наличие окислительных процессов. В то же время в составе засаленного слоя в большом количестве присутствуют элементы основных компонентов быстрорежущей стали – Mn, Fe, Cr и Si. Это свидетельствует о том, что они без изменений диффундировали с поверхности затачиваемых пластин на поверхность круга.

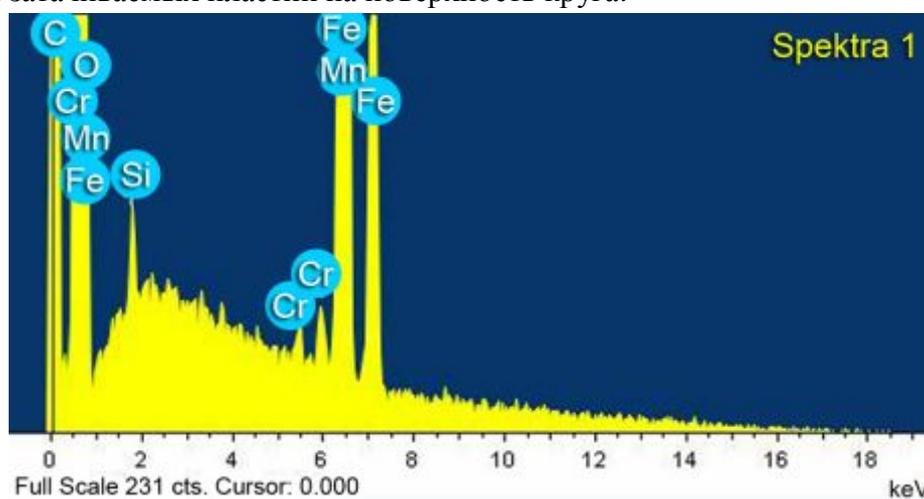


Рис.7. Спектральный анализ засаленного слоя после обработки БРС.

## 5. Результаты и обсуждение.

Проведённые исследования показали, что рекристаллизация происходит не во время деформации, а сразу после её окончания, и тем быстрее, чем выше температура. Однако температура, возникающая в зоне контакта при КЭАО, составляет всего  $150^\circ\text{C}$  и не вызывает рекристаллизацию элементов, входящих в состав быстрорежущих сталей. По данным (2), температура их рекристаллизации составляет: Fe –  $450^\circ\text{C}$ , Cr –  $850\text{...}1075^\circ\text{C}$ , W –  $1200^\circ\text{C}$ , V –  $700\text{...}800^\circ\text{C}$ , Mo –  $850\text{...}1220^\circ\text{C}$ . Зафиксированная температура является очень хорошим показателем, потому что высокая твёрдость инструмента из БРС сохраняется при нагреве до  $500\text{...}600^\circ\text{C}$ .

Можно отметить, что в процессе формирования засаленного слоя, а также дефектного, при обработке без СОЖ, тепловой фактор играет первостепенную роль: именно он, в конечном счёте, является основным инициатором физико-химических явлений и реакций. Имеются, однако, и другие данные, свидетельствующие о том, что не всегда температуре принадлежит главенствующая роль. Очевидно, когда в контакте между шлифовальным кругом и затачиваемым инструментом находится третья среда, а именно СОЖ и её активные компоненты, то они могут перекрыть тепловой фактор (4).

Рост зёрен карбидов приводит наряду с увеличением твёрдости к снижению прочности инструмента и как следствие его стойкости. В результате стойкость инструмента

будет составлять всего несколько секунд, поэтому закаленную БРС практически невозможно обрабатывать обычными электроалмазными методами, при которых температура в зоне контакта может достигать порядка 1200°C. Поэтому для эффективной и высокопроизводительной технологии затачивания режущего инструмента необходимо стремиться к созданию условий снижающих образование тепла.

## **6. Выводы.**

Основные выводы, сделанные на основании данного исследования, могут быть представлены следующим образом:

(1) Процессы и реакции, совершаемые на атомно-молекулярном уровне, оказывают первостепенное влияние на процесс резания, на качество заточенного инструмента и работоспособность алмазного круга.

(2) Образование засаженного слоя сопровождается рядом дополнительных, адгезионно-диффузионных и химических процессов протекающих при физическом взаимодействии.

(3) Температура, в зоне контакта при КЭАО, составляет всего 150°C и не вызывает рекристаллизацию элементов, входящих в состав БРС.

(4) Наиболее оптимальными режимами являются следующие:  $V = 35$  м/с;  $S = 1 \dots 1,5$  м/мин;  $t = 0,015 \dots 0,02$  мм/дв.ход;  $i_{пр} = 0,17 \dots 0,25$  А/см<sup>2</sup>;  $i_{тр} = 6,25$  А/см<sup>2</sup>. На данных режимах шероховатость поверхности находится в пределах  $R_a = 0,06 \dots 0,07$  мкм, алмазный круг работает в режиме самозатачивания, дефектный слой образцов и температура в зоне контакта минимальны.

## **References:**

1. Chang CC, Szeri AZ. A thermal analysis of grinding. *Wear* 1998;216(1):77. [\[Google Scholar\]](#)
2. Gulyaev AP. Adaptive metallurgy: Metallurgy. Moscow: USSR; 1978. [\[Google Scholar\]](#)
3. Hegeman JBJW, JThM DH, With, G. De . . 2001;248(1–2):187. [\[Google Scholar\]](#)
4. Kudryashov SM, Yanyushkin AS, Popov VY. Use of mineral brines to remove loading layer after combined electric diamond grinding of the high-speed steel R6M5. *Systems. Methods. Technologies* 2010;6:109. [\[Google Scholar\]](#)
5. Us PD, Singh V, Venkateswara Rao P . A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2010;50(3):231. [\[Google Scholar\]](#)
6. Popov VY. Improving the quality of products of tool steel in electric diamond grinding: A thesis for the degree of candidate of technical sciences. Bratsk: unknown; 2002. [\[Google Scholar\]](#)
7. Popov VY, Bolshakov IM, Guglin GS, Rasputin EV. Research process loading diamond grinding wheels on a metal bonded during processing high-speed steel R6M5. *Mechanics XXI century* 2010;9:101. [\[Google Scholar\]](#)
8. Popov VY, Yanyushkin AS. Study of the surface of diamond wheels after combined electric diamond grinding of the tool stee. *Technology of machine building* 2013;11:26. [\[Google Scholar\]](#)
9. Ripan R, Ceteanu I. Inorganic chemistry. Mir: Moscow; USSR 1972;2:872. [\[Google Scholar\]](#)

10. Schöpf M, Beltrami I, Boccadoro M, Kramer D. ECDM (Electro Chemical Discharge Machining), a New Method for Trueing and Dressing of Metal Bonded Diamond Grinding Tools. CIRP Annals – Manufacturing Technology 2001;50(1):125. [\[Google Scholar\]](#)
11. Yanyushkin AS, Arhipov PV. Atomic-molecular processes in the contact zone of diamond wheel and work material. Technology of metals 2010;1:25. [\[Google Scholar\]](#)
12. Yanyushkin AS, Losev AB, Yakimov SA, Popov VY. The role of temperature while sharpening tools diamond wheels on a metal bonded. Metallurgy and machine-building: Quarterly specialized information-nual newsletter 2006;1:49. [\[Google Scholar\]](#)
13. Yanyushkin AS, Medvedeva OI, Arhipov PV, Popov VY. The mechanism of formation of protective coatings on diamond wheels on a metal bonded. Systems. Methods. Technologies 2010;5:132. [\[Google Scholar\]](#)
14. Yanyushkin AS, Medvedeva OI, Yanyushkin SA, Popov VY. Physical-chemical interaction of the tool and the workpiece materials consumption, electrochemical grinding. Proceedings of the Bratsk State University 2012;1:183. [\[Google Scholar\]](#)
15. Yanyushkin AS, Popov VY. Surface diamond wheel after electric diamond grinding HSS. Proceedings of the Bratsk State University 2002;2:146. [\[Google Scholar\]](#)
16. Yanyushkin AS, Popov VY, Vasilev EV, Popov AY. Combined electric diamond grinding of the tool steel. BrSU: Bratsk, Russia; 2009. [\[Google Scholar\]](#)
17. Yanyushkin AS, Shorkin VS. Contact processes during grinding: Machine-building-1. Moscow: Russia; 2004. [\[Google Scholar\]](#)