

В.Я. Лебедев, к.т.н.

А.М. Кузей, д.т.н.

ГНУ «Фізико-технічний інститут НАН Беларусі»

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ С ПОЛИАБРАЗИВНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ЛЕГКОПЛАВКОГО СТЕКЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ХРУСТАЛЯ

В статье представлены результаты испытаний алмазоабразивных композитов и эксплуатационных показателей алмазных кругов с различными составами связок при шлифовании художественного стекла, рассмотрена кинетика изнашивания рабочих поверхностей кругов форм 1EE1 и 1EE1 композиционными наполнителями на базе высоконаполненного легкоплавкого стекла.

Введение. При обработке художественного стекла (хрусталя) используется, в основном, инструмент из алмазоабразивных композиционных материалов на металлических связках. Реже применяется инструмент на органических или керамических связках. Основные формы применяемого инструмента 1EE1, 14EE1, 1A1, 1FF1, 6A2. Технические требования к кругам регламентированы ГОСТ 30352. Работоспособность инструмента определяются маркой, зернистостью и концентрацией алмазного порошка и связкой. Причем свойства связки часто определяет работоспособность в конкретных условиях, режущую способность круга и удельный расход алмазов [1].

Для изготовления алмазного инструмента, применяемого при обработке художественного стекла, обычно применяют шлифпорошки из синтетических алмазов марок AC6–AC15 узких фракций. Концентрация алмазов в режущих композитах составляет 25–100 %. Особое внимание уделяется рассеву порошков, так как наличие предельных фракций в таком инструменте ухудшает качество обработки и резко увеличивает затраты на химическое полирование.

Удаление обрабатываемого материала при шлифовании стекла происходит в результате хрупкого разрушения. Это подтверждают ряд экспериментальных данных [2–3]. Повышенная хрупкость стекол и ряда других хрупких неметаллических материалов характеризуется большой разностью пределов прочности при растяжении и сжатии. В то же время указанные материалы обладают практически идеальной упругостью при значении $\sigma_{сж}$, достигающем 2400 МПа. Подобные показатели имеют также оксидная керамика и лейкосапфир. При

двухосном сжатии стекол наблюдается линейная зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения, а значения деформаций подчиняются обобщенному закону Гука. При деформировании неметаллических тел развиваются два конкурирующих процесса – микроскопическое разрушение и упрочнение структуры [4].

В процессе обработки стекла при микроскопическом разрушении его поверхностного слоя вершинами абразивных зерен под ними возникают области напряжения сжатия, а ниже – растяжения [5]. При $\sigma_{сж} = 1000 - 2000$ МПа возникает только упругая деформация. Когда значение напряжения под острием зерна достигает предела текучести стекла, в макрообластях размером 100 мкм и более имеет место хрупкое разрушение с одновременным проявлением пластических явлений. Таким образом, проникающее действие твердого острия зерна вызывает пластическую деформацию, а внутренние напряжения растяжения являются причиной деструкционных явлений. При $\sigma_{сж} = 5000-6000$ МПа начинается вязкое течение стекла и пластическая деформация в областях менее 100 мкм. Таким образом, хрупкое разрушение под вершинами зерен определяет энергию разрушения и эффективность снятия припуска при шлифовании стекла, а деформация в прилегающих микрообъемах является сопутствующим фактором при диспергировании стекла.

Считается, что алмазные зерна используют в шлифовальных инструментах лишь небольшую часть (до 10 %) своих потенциальных возможностей. Уровень их использования может быть повышен при увеличении прочности удержания зерен связкой на границе их раздела и обеспечения величины выступания зерен из связки, большей глубины их врезания для образования необходимого пространства, в котором распределяется обрабатываемый материал, смазочно-охлаждающие средства и продукты диспергирования.

Технологические процессы изготовления режущих композиционных материалов в алмазоабразивном инструменте методами порошковой металлургии включают несколько основных операций: смешивание компонентов шихты связки, смешивание компонентов алмазосодержащей шихты, холодное прессование брикета алмазосодержащей шихты, спекание с горячим прессованием брикета [6–8]. Алмазосодержащая шихта инструментов для обработки стекла состоит, как правило, из связующих на основе систем Cu-Sn (Cu-Zn, Cu-Zn-Sn), алмазного порошка и наполнителей.

При спекании и горячем прессовании брикета формируется матрица композиционного материала, обеспечивающая закрепление

(удержание) режущих элементов – алмазных зерен. Как правило, матрица формируется на операции спекания (частично горячего прессования) при взаимодействии дискретных, дисперсных металлических или стеклянных частиц, образующих монолитный материал. Свойства матрицы определяются ее химическим составом и могут варьироваться изменением пористости и состава за счет введения различного рода наполнителей.

В качестве наполнителей алмазосодержащих композитов используются дисперсные и ультрадисперсные частицы инертных по отношению к матрице материалов: SiC, SiO₂, B₄C, графит и т. д. [8–10]. Традиционно основными функциями наполнителей является повышение эксплуатационных характеристик алмазосодержащих композиционных материалов (коэффициента трения, износостойкости, алмазоудержания) и механических характеристик (твердости, предела прочности). Полагаем, что придание наполнителям режущих функций с улучшением процесса самозатачивания и одновременно флюсующих агентов позволит повысить рабочие характеристики алмазосодержащих композитов и инструмента на их основе. Решением может быть использование дисперсных частиц B₄C, SiC и тому подобных в качестве наполнителей химически нестойких стекол с низкими температурами перехода в вязко-пластичное состояние, что позволит реализовать их абразивные свойства, снизить степень «засаливания» связки и, одновременно повысить твердость и прочность связки.

В качестве основы легкоплавких стекол использовали борный ангидрид в качестве легирующих компонентов – SiO₂, P₂O₅, Na₂O. В качестве наполнителей использовали порошки B₄C, SiC, а также алмаза фракций 20/14 – 1/0 и 60/40. Концентрация наполнителей в композиционных материалах варьировала от 75 до 50 % об.

Композиционные материалы систем SiC – B₂O₃, B₄C – B₂O₃, (SiC – алмаз – B₂O₃, (B₄C – алмаз) – B₂O₃ получали прямым синтезом при взаимодействии борной кислоты, аморфного оксида кремния и дигидрофосфата натрия в условиях одновременной дегидратации борной кислоты при 875 – 925 К в течение часа. Спекы дробили и рассеивали по фракциям 315/200, 200/160, 100/80, 80/63 – 50 мкм. Отдельные результаты испытаний на прочность гранул приведены в таблице 1.

Анализ результатов показывает, что во всех системах B₄C – B₂O₃, SiC – B₂O₃, (SiC – алмаз) – B₂O₃, (B₄C – алмаз) – B₂O₃ снижение объемного содержания легкоплавкого стекла приводит к повышению прочности композиционных порошков. Величина нагрузки, при

которой происходит разрушение частиц, определяется составом, структурой частиц и их формой. Максимальные значения прочности частиц могут быть обусловлены их свойствами либо формой (размером). Среднее значение этих величин достаточно адекватно отражает прочностные характеристики частиц композиционных материалов. Увеличение числа частиц с высокими показателями прочности при одновременном увеличении средней величины по мере снижения концентрации стекла в композиционном материале позволяет полагать, что снижение концентрации (объемной) матричного материала приводит к увеличению прочности частиц $B_4C - B_2O_3$ (табл. 1). Низкие значения прочности частиц могут свидетельствовать об их дефектной структуре. Формирование такой структуры может происходить на стадиях приготовления стекла и стадии дробления.

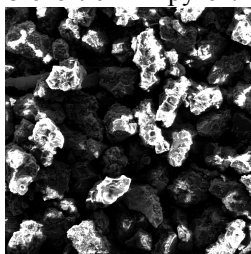
Таблиця 1

Влияние концентрации B_2O_3 на прочность частиц композиционного материала $B_4C - B_2O_3$ и ($B_4C +$ алмаз 10 % об.) – B_2O_3 зернового состава 100/80 мкм

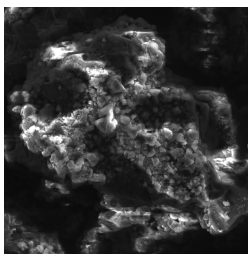
№ п/п	Разрушающая нагрузка, Н					
	концентрация B_2O_3 в композиционном материале, % об.					
	50		40		25	
	$B_4C - B_2O_3$	$B_4C +$ алмаз – B_2O_3	$B_4C - B_2O_3$	$B_4C +$ алмаз – B_2O_3	$B_4C - B_2O_3$	$B_4C +$ алмаз – B_2O_3
1	60	410	90	360	310	300
2	110	260	120	190	130	450
3	340	130	330	210	200	620
4	110	170	270	110	500	700
5	170	60	160	190	310	190
6	90	430	60	70	90	130
7	60	60	130	320	100	410
8	110	300	250	180	90	90
9	120	130	320	460	70	500
10	150	190	280	110	100	210
11	70	210	240	90	90	170
12	100	370	60	330	130	110
13	240	290	80	220	190	130
14	60	200	390	140	420	100

15	340	100	240	170	500	90
16	290	90	320	260	270	360
17	130	370	210	300	100	270
18	300	450	120	460	90	200
19	210	360	130	500	140	540
20	180	220	200	410	60	360
21	320	170	200	130	200	250
22	200	130	100	200	210	120
23	170	200	60	150	160	300
24	140	100	140	200	100	190
25	90	180	90	340	150	230
Прочність, МПа	1,7	2,2	1,8	2,4	1,9	2,8

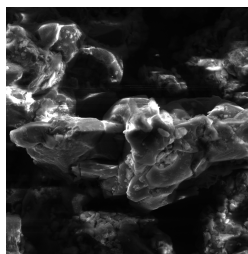
На рисунке 1 приведен внешний вид, микроструктура и морфология поверхностей композиционных гранул, которые использовались в качестве модификатора шихты связки при изготовлении кругов.



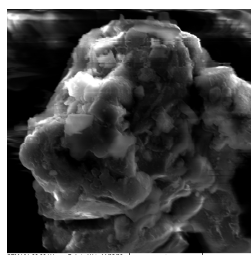
а)



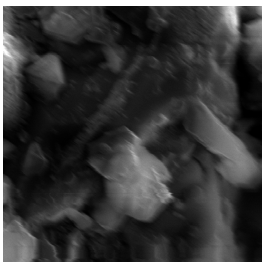
б)



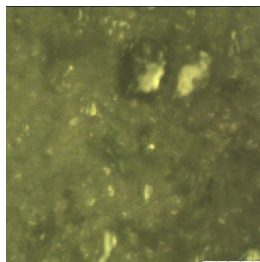
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Стрoение гранул ($B_4C + ACH\ 7/3$) – B_2O_3 . Зернистость 160/100 мкм: а – обций вид; б, в – морфология гранул; г, д – морфология поверхности гранул; е – микроструктура

В композиционной связке гранулы способны выполнять роль режущего элемента и связующего. Анализ морфологии и строения поверхности гранул, полученных при дроблении спеков, показал, на их поверхностях расположены частицы алмаза (карбидов бора или кремния). Т.е. при дроблении не происходит разрушения абразивных частиц, а они прочно удерживаются матрицей (рис. 1 в, д).

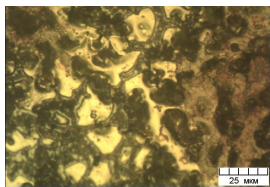
В области концентраций B_2O_3 60–70 % об. в системах $B_4C - B_2O_3$, $SiC - B_2O_3$, ($B_4C - \text{алмаз}$) – B_2O_3 , после спекания и охлаждения суспензий формируются композиционные материалы с достаточно однородным распределением частиц твердой фазы. Значительные различия в прочности композиционных материалов могут быть связаны с межчастичным взаимодействием между расплавом и частицами B_4C , SiC , алмаза, либо неравномерным распределением расплава (после охлаждения – стекла) в композиционном материале. В композиционных материалах с объемным содержанием B_2O_3 в матрице 50 % отмечаются участки с более высокой концентрацией наполнителя. Причиной неравномерного распределения дисперсных частиц в матрице является сегрегация и седиментация твердой фазы при выдержке стеклянной суспензии. Неоднородное распределение дисперсных частиц в расплаве вызвано различной вязкостью расплава из-за низких скоростей смешения и растворения компонентов стекла (дисперсного оксида кремния). Сегрегация дисперсных частиц на стадии смешивания и плавления компонентов стекла приводит к образованию пор. В области концентраций $B_2O_3 - 40$ % об. распределение дисперсных частиц в матрице более однородное. Тем не менее, отдельные поры существуют и в гранулах с концентрацией $B_2O_3 - 40-25$ % об. Дробление таких спеков с неравномерным распределением при однократном ударе бойка (либо однократном цикле дробления на прессе при давлении 100 МПа) не приводит к массовому дроблению частиц размером 2000–1000 мкм. Для получения гранул различной зернистости проводили размол дробленных спеков в шаровой мельнице. Исследования показали, что гранулы фракций 50/63–160/100 спекаются уже при 875 К. Образование монолитного композита происходит при давлении горячего прессования от 3 МПа. Причиной этого является переход матричного материала (стекла) в интервале температур изготовления алмазосодержащих композиционных материалов в пластичное и вязко-

пластичное состояние, что и приводит к усадке и массовому образованию контактов между гранулами. В таблице 2 представлены характеристики композиционных материалов полученных при спекании и горячем прессовании гранул.

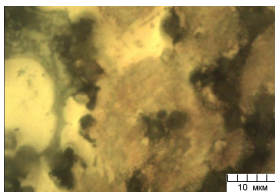
Таблица 2

*Влияние режимов спекания на твердость брикетов композиционных материалов систем B_2O_3 – карбид кремния при концентрации B_2O_3 – 50об %, SiC – 25об%, алмаз (АСН 7/3) – остальное.
Давление горячего прессования 10 МПа*

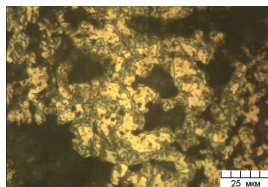
Фракция гранул	Твердость, HRB		
	температура спекания, К		
	875	925	975
63/50	29,3	30,1	30,6
80/63	27,4	30,5	31,1
160/100	30,8	34,7	36,4



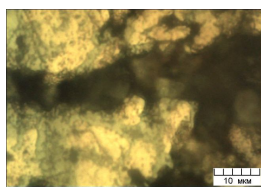
а)



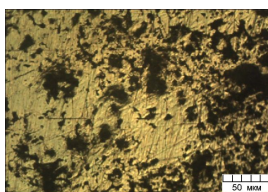
б)



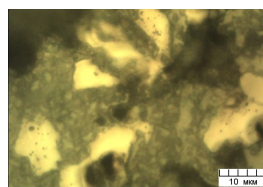
в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Композиционные материалы Si 80 масс. % - Sn – наполнитель. Температура спекания 1000 К, давление горячего прессования 30 МПа: а, б, в – распределение наполнителя из микропорошка АСН 7/3, б – прослойки оловянно-медного сплава между конгломератами АСН 7/3; в – участки скопления частиц АСН 7/3 в матрице; г, д, е – наполнитель гранулы (15 мас. %, е – 5 мас. %) B_2O_3 – АСН 7/3 – карбид бора 5/3

В дальнейшем исследовании изучали влияние концентрации полученных композиционных наполнителей (гранул) на прочность композиционных материалов на медно-оловянной основе. Введение гранул в металлическую матрицу сопровождается при прочих равных условиях, увеличением твердости и прочности композиционного материала. В отличие от гранул, частицы микропорошков (АСН 3/7, карбида кремния) при их введении в металлическую матрицу в свободном состоянии, образуют конгломераты, в которых отсутствуют контакты частиц с матричным материалом (рис. 2). Дисперсные частицы блокируют частицы меди и олова, снижая степень взаимодействия между компонентами (рис. 2 в, з).

Алмазные (абразивные) зерна связаны стеклом в гранулу, которая как более твердая частица, выступает из металлической матрицы. Границы гранулы с матричным материалом не четкие, размытые, что свидетельствует о деформации гранул при горячем прессовании (рис. 2, з). Частицы абразивов в грануле выступают из стекла и играют роль отдельных режущих элементов (рис. 2, д, е). В отличие от композиционных материалов содержащих отдельные частицы абразивов (АСН 7/3, карбид кремния), абразивные частицы, объединенные в гранулы, не препятствуют процессам взаимодействия между компонентами матрицы алмазосодержащего композиционного материала (рис. 2, з, е).

Повышение концентрации гранул в композиционном материале с 15 до 30 масс% не приводит к изменению характера взаимодействия между компонентами матрицы. Деформация и течение материала гранул при горячем прессовании формируют развитие рельефа на поверхности композиционного материала. Одновременно, формируется и развитая сеть межфазных границ стекло-металл. Это приводит к увеличению твердости композиционных материалов. В таблицах 3, 4 приведены значения твердости композиционных материалов полученных из шихты связки, содержащей гранулы и органический пластификатор.

Таблица 3

Твердость композиционных материалов системы Cu 80 мас. %- Sn при различной концентрации пластификатора. Фракция гранул 100/80 мкм. Давление горячего прессования 10 МПа

Концентрация пластификатора, мас. %	Твердость, HRB		
	Температура спекания, К		
	815	925	975
1 полиэтиленполиамин	67,1	72,3	77,8
2 полиэтиленполиамин	69,2	73,4	79,5
1 вазелиновое масло	54,3	65,2	74,6

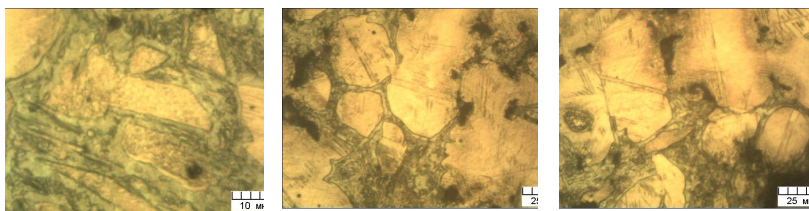
Таблица 4

Твердость композиционных материалов медь – 20 мас.% олово – гранулы наполнителя (карбид бора – легкоплавкое стекло) различной концентрации при режимах спекания: 1 стадия 955 К (15 МПа 40 минут), 2-стадия - 995 К (80 минут)

Концентрация наполнителя, об. %	Твердость, HRB							
	Давление второго горячего прессования, МПа							
	30				60			
12	78	80	71	76	82	84	78	76
25	80	86	89	81	83	84	79	73
30	83	82	90	87	85	86	80	83

Результаты испытаний показывают, что использование в качестве пластификатора полиэтиленполиамина повышает твердость композиционных материалов на основе системы $Cu-Sn$, изготовленных при пониженных (815–975 К) температурах и давлениях (40–60 МПа). Введение гранул в шихту, дополнительно повышает твердость на 10–15 единиц HRB.

Параметры технологических процессов спекания и горячего прессования зависят от объема жидкой фазы и скорости его изменения. В интервале температур существования жидкой фазы (олова) 500–675 К, скорость диффузии олова в медь мала, растворимость меди в олове достаточно высока [4–5], что делает возможным формирование алмазонасного слоя, используя низкие давления. Кроме того, в этом температурном интервале происходит термодеструкция пластификатора, а процессы восстановления (окисления) и растекания расплава, под действием выделяющихся газообразных продуктов деструкции, завершились. Использование предварительной горячей прессовки на стадии нагрева пресс-формы до температуры отжига (и горячего прессования) позволяет интенсифицировать процессы сплавообразования. Прессование брикета, после нагрева в течение 20 минут до 775 К формирует структуру, указывающую на присутствие в брикете значительного объема жидкой фазы (рис. 3, а). Достаточно большие объемы жидкой фазы присутствуют при 825 К (рис. 3, б). Снижение объема расплава в брикете фиксируется при 975 К и длительности нагрева 35 минут (рис. 3, в).



а)

б)

в)

Рис. 3. Микроструктура композиционного материала медь – 20 мас. %, олово – 10 мас. % гранулы $B_4C - B_2O_3$. Давление горячего прессования – 20 МПа. Температура прессования: а – 775 К; б – 825 К; в – 975 К

Двухстадийное прессование позволяет формировать при более низком давлении структуры композиционных материалов, аналогичные получаемым при 1025–1045 К и сохранить исходную форму композиционных гранул «карбид бора – стекло». Дисперсные частицы (осколки) стекла, карбида бора со стеклом, несмотря на снижение давления прессования, формируют вторичные, достаточно разветвленные структуры. Эти структуры представляют собой прослойки стекла и карбида бора со стеклом, расположенные между частицами медного сплава и медной эвтектикой.

Твердость композиционных материалов возрастает с увеличением температуры спекания и давления прессования. Двухстадийное спекание и горячее прессование повышают (при прочих равных условиях) твердость композиционных материалов системы карбид кремния – легкоплавкое стекло за счет более полного взаимодействия компонентов композиционного материала. Рост твердости композиционных материалов при увеличении продолжительности спекания на второй стадии, показывает, что на первой стадии спекания взаимодействуют лишь компоненты, имеющие общие контактные поверхности.

На разработанных композиционных материалах для алмазного инструмента с высоконаполненными композиционными наполнителями изготовлена партия кругов с различными составами связок. Испытаниям подвергались алмазные круги формы 14EE1 250×8×10×32 с углом при вершине 110° с характеристиками AC6 100/80p 50 % M2-01O. Данным инструментом проводилось шлифование хрустальных брусков с содержанием $PbO = 24\%$ и размерами 200×100×20 мм. Для проведения испытаний разработан

стенд и наладка на универсально-заточной станок 3Е642, которые позволяют обеспечить постоянное усилие на круг и компенсирует потери на сопротивление движению в направляющих станка. ГОСТ 30352 предусматривает проведение испытаний алмазных кругов для обработки стекла по критериям работоспособности, режущей способности и удельного расхода алмаза при работе с постоянным усилием прижима круга к заготовке. Методика испытаний кругов на разработанном стенде позволяет проводить исследование кинетики изнашивания и стойкости кругов в диапазоне усилий прижима 1–6 кг и скоростей резания 10–50 м/с.

Масса уравнивающего груза подбиралась из условия обеспечения перемещения стола без действия на испытываемый образец сил резания. Величина рабочей нагрузки, создающей необходимое тяговое усилие стола, составляла 3, 4 и 5 кг. Обрабатываемая поверхность образца устанавливалась параллельно движению стола станка. Круги испытывали с охлаждением водой, подаваемой в зону резания непрерывным поливом с расходом 2–3 л/мин. Состояние поверхностей инструмента оценивали на микроскопе БМИ-1, а после износа более 70 % вырезались образцы рабочего слоя для исследования на микроскопе VEGA II TESCAN.

Для каждого круга определялись производительность шлифования Q ($\text{см}^3/\text{мин.}$), удельный расход алмазов q ($\text{мг}/\text{см}^3$) и время шлифования (1 прохода образца хрусталя) и полный период стойкости.

Удельный расход алмазов определялся методом взвешивания. Масса материала образца, снимаемая за испытание, составляла не менее 200 г и определялась взвешиванием образцов до и после испытания. Материал образцов удалялся по двухпроходной схеме по одной трассе. Глубина шлифования t для каждого прохода составляла 2 мм. Длительность обработки по проходам контролировали секундомером и по отметкам на осциллограмме мощности шлифования. Рабочая скорость круга была постоянной и составляла 28,2 м/с. Отдельные результаты испытаний кругов представлены в таблице 5.

Таблица 5

Эксплуатационные характеристики опытных кругов

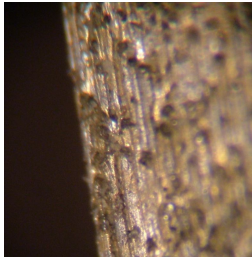
№ круга	q , мг/см ³		Q , см ³ /мин.	
	1 правка	2 правка	1 правка	2 правка

1	0,167	0,160	17,3	18,1
2	0,145	0,148	18,5	19,7
3	0,152	0,150	17,3	18,2
4	0,154	0,155	16,7	17,8
5 М2-01 стандарт	0,165	0,161	15,3	15,7

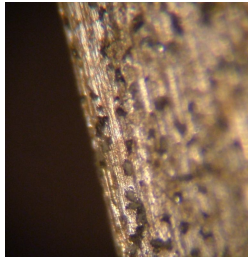
На первом этапе для всех кругов характерен ускоренный износ и быстрое округление кромки круга. Время прохода длины образца составляет на нечетном проходе 8–9 с, на четном 11–15 с. За 2–3 прохода процесс стабилизируется с показателями 4–5 и 8–9 с соответственно. Вскрытие круга на заточном станке в жестком режиме для всех практически кругов одинаково негативно влияет на производительность обработки. После 3–4 проходов происходит интенсивное обнажение новых алмазных зерен, разрушение уже работающих. Наличие большого числа активных режущих кромок способствует более легкому и быстрому удалению материала. При выполнении четных проходов, когда объем удаляемого материала и площадь контакта круга и обрабатываемого образца возрастают, время шлифования увеличивается в 2–3 раза после 80–100 проходов (10–14 минут наработки). Для стандартного круга наблюдается более значительный рост времени шлифования. Данные различия в работе кругов можно объяснить большей самозатачиваемостью опытных кругов вследствие растворения стекла модифицирующего наполнителя водой. Наличие модификаторов изменяет соотношение силы резания и трения, оказывает влияние на интенсивность изнашивания указанных алмазных кругов. Волнообразный характер зависимости производительности от времени шлифования указывает на наличие эффектов засаливания и самозатачивания и значительного их изменения для кругов различного состава. Особенно отчетливо это прослеживается для круга с содержанием модифицирующих гранул $V_4C - V_2O_3$ более 20 об. %. Оптимальная концентрация модификатора составляет 10–12 об. %.

Во всех случаях изнашивание испытываемых кругов происходило наиболее интенсивно по вершине круга, где алмазоудержание невысокое ввиду максимальной нагрузки и наличия минимального объема связки, удерживающей зерно. Вдоль рабочих поверхностей кругов располагаются треки, имеющие как кольцевой вид, так и вид отдельных спиралей с малым закруглением. Короткие спиральные канавки вызываются прокатыванием разрушенных алмазных зерен со шламом в зоне резания.

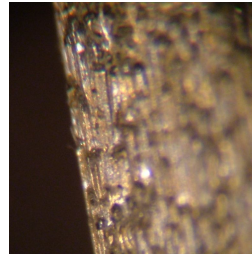
На рисунку 4 представлені картини изношених робочих поверхностей алмазних испытаних кругів, не достигших критического износа (на уровне 50–60 % периода стойкости) и состояние обработанной поверхности хрусталя.



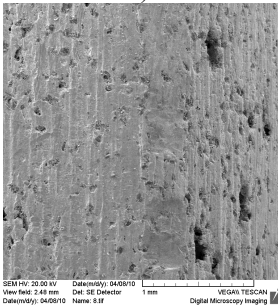
a)



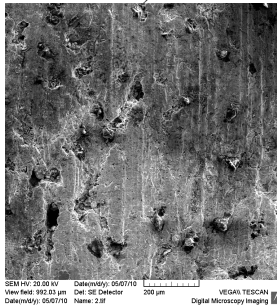
б)



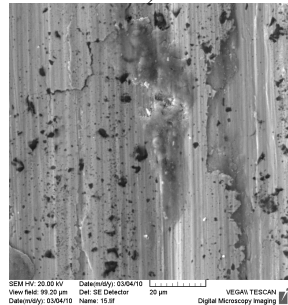
в)



г)



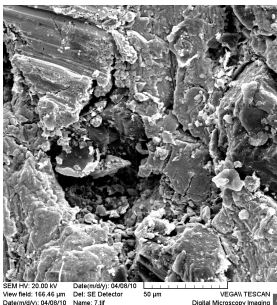
д)



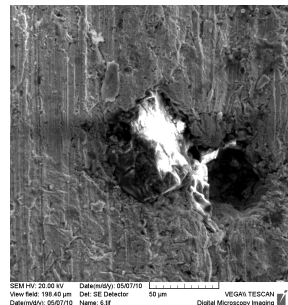
е)



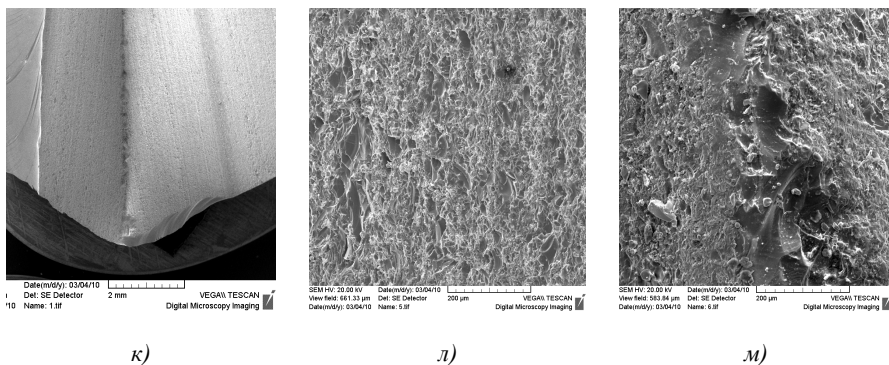
ж)



з)



и)



к)

л)

м)

Рис. 4. Характер и морфология износа алмазных кругов при обработке хрустала - круг № 1 (а, г, ж), круг № 2 (б, д, з), круг № 5 (в, е, и); вид обработанной поверхности хрустала (к, л, м)

Выводы. Проведенные исследования показали, что разработанный инструмент для обработки хрупких материалов (хрустала, стекла и др.), обеспечивает стабильный режим шлифования с высокой режущей способностью. Использование в алмазосодержащих композиционных материалах гранул на основе карбида бора и карбида кремния повышает размерную стойкость инструмента, не влияя на режимы правки и чистки режущих поверхностей. Повышение плотности матричного материала, приводит к значительному повышению износостойкости алмазного инструмента. Разработанные алмазосодержащие композиционные материалы имеют большую твердость и прочность, чем стандартные, однако они достаточно легко поддаются ручной чистке абразивными брусками. Применяемые в качестве наполнителей матрицы гранулы композиционных материалов, несмотря на меньшую твердость, чем алмазные зерна, полностью не разрушаются при правке алмазобразивного инструмента и являются дополнительными режущими элементами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Перерозин М.А.* Справочник по алмазной обработке стекла. М.: Машиностроение, 1987.- 224с.
2. *Newton I., Opticks*, 1965, from Holland// The Properties of Glass Surfaces, Chapman and Hall, London, 1964, p. 16.
3. *Fielden J. H., Rubenstein C.* The Grinding of Glass by a Fixed Abrasive// Glass Technology, Vol. 10, No. 3, 1969, p. 73.

4. *Литов Ю. Н.* Кинетика разрушения и упрочнения деформируемых твердых тел//Докл. АН УССР, 1979, 245, №4, с. 809 – 811.
5. *Minář S.* Základní poznatky určující směry řešení, intenzifikace presheho abrábění optickeno skla// Jemna mech. A opt. 197, N10/12, S. 280 – 283, 311 – 316, 340 – 343.
6. А.с. 189727 СССР МКИ 80b, 11/20. Состав для изготовления алмазного инструмента. № 855420/25-8; опубл. 30.11.66. Бюл. № 24.
7. Патент 2006090527 ВОИС (WO) МПК 8В 24D3/14. Шлифовальный круг на стекловидной связке и способ его изготовления. - № 05/024222; заявл. 27.12.2005; опубл. 31.08.2006, Изобретение стран мира, вып. 19, № 8. 2007.
8. *Ваксер Д.В., Иванов В.А., Никитков Н.В., Рабинович В.Б.* Алмазная обработка технической керамики / М.: Ленингр. отделение, Машиностроение, 1976. – 160 с.
9. *Ардамацкий А.Л.* Алмазная обработка оптических деталей / М.: Ленингр. отделение, Машиностроение, 1978. – 230 с.

ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси».

Научные интересы:

- инженерия поверхности;
- процессы граничного взаимодействия при механической и физико-технической обработке;
- алмазно-абразивные и лезвийные инструменты из сверхтвердых материалов: технология изготовления, испытания и сертификация.

КУЗЕЙ Анатолий Михайлович – доктор технических наук, заведующий лабораторией ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси».

Научные интересы:

- структурно-фазовые превращения в метастабильных сплавах и композиционных материалах.

Подано 15.07.2011