

А.М. Кузей, д.т.н.*Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь***В.Г. Кудрицкий, н.с.***Институт механики металлополимерных систем
им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь*

ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫЕ АЛМАЗОАБРАЗИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА КЕРАМИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Эффективность использования алмазоабразивного инструмента и производительность операции резания определяются согласованностью скоростей износа матрицы композиционного материала и абразивного (алмазного) зерна. Варьирование твердости матрицы (изменением содержания наполнителя, с одной стороны, и регулированием пористости, с другой) позволяет получить оптимальное соотношение скоростей износа матрицы и алмазного зерна. Предметом исследования являлись высоконаполненные абразивные композиционные материалы с алмазным зерном и керамическими связками (матрицами), а также изменение морфологии поверхности зерна и матрицы при обработке сверхтвердых материалов. В качестве матрицы использовались керамические композиционные материалы, состоящие из связующих – легкоплавких стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ – и наполнителя – кристаллического карбида кремния SiC . Методами сканирующей электронной микроскопии изучены микроструктура и морфология поверхностей износа композиционных материалов алмаз–карбид кремния–оксидное стекло при обработке природного алмаза. Показано, что введение оксидного стекла в композиционный материал в форме пленки на поверхности частиц карбида кремния позволяет получать высокопористые (10–30 отн. % пор) высоконаполненные (100–150 отн. % алмаза) композиционные материалы с пределом прочности на сжатие 350–740 МПа.

Ключевые слова: алмазоабразивный инструмент; композиционные материалы; износ; морфология поверхности; сканирующая электронная микроскопия.

Введение. Постановка проблемы. Оптимум эксплуатационных характеристик алмазоабразивного инструмента реализуется в весьма узком диапазоне режимов шлифования. Помимо этого, эксплуатационные характеристики алмазосодержащего композиционного материала зависят и от конструктивных особенностей инструмента [1, 2]. Принято считать, что оптимум

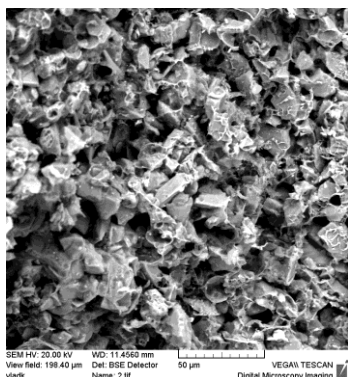
эксплуатационных характеристик алмазосодержащего композиционного материала достигается в условиях минимального износа связки (матрицы композиционного материала), при котором поддерживается стабильный режим шлифования. Износ связки в этом случае приводит к обнажению новых вершин алмазных зерен взамен изношенных, а также разрушенных. Для алмазосодержащих композиционных материалов с полимерным связующим подобные условия достигаются при 40–50 об. % содержании связующего в составе связки (матрицы композиционного материала). Алмазосодержащие композиционные материалы с полимерным связующим обладают высокой режущей способностью и применяются для обработки сверхтвердых композиционных материалов, алмаза. При шлифовании сверхтвердых композиционных материалов (поликристаллов кубического нитрида бора и алмаза) композиционные материалы с полимерным связующим обеспечивают малое выступление алмазных зерен из связки, а алмазные зерна имеют возможность перемещаться при деформации матрицы. Благодаря этому сглаживаются значения нагрузок на алмазные зерна и повышается качество обрабатываемых поверхностей [3, 4]. Шлифование сверхтвердых композиционных материалов в режиме самозатачивания достигается при достаточно высоких значениях силовой составляющей процесса: давление в зоне контакта может достигать 30–50 МПа [4, 5]. Высокая скорость износа матриц композиционных материалов с полимерным связующим позволяет использовать их для обработки всех известных материалов, в том числе и сверхтвердых. Однако, помимо высокой скорости износа, матрицы композиционных материалов, содержащих 40–50 об. % полимера, не обеспечивают закрепления алмазных зерен в матрице, что приводит к нарушению режима «самозатачивания»: алмазные зерна выкрашиваются из матрицы, дестабилизируя режим шлифования.

Использование для обработки сверхтвердых материалов алмазосодержащих композиционных материалов с износостойкими матрицами (металлическими) требует применения искусственных методов (химическое или электрохимическое растворение) стабилизации режущей способности [6, 7]. Универсальным методом изменения режущей способности является варьирование пористой микроструктуры матриц алмазосодержащих композиционных материалов [1, 2, 6]. Сочетание высокой прочности связующих и пористой микроструктуры матрицы композиционных материалов позволяет в достаточно широком диапазоне режимов шлифования

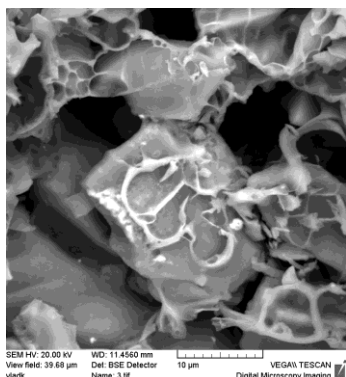
сверхтвердых материалов достигать согласованной с режимом шлифования скорости износа связи и алмазных зерен. Одним из таких связующих являются легкоплавкие стекла системы $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{K}_2\text{O}\cdot\text{ZnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ с температурами начала размягчения 675–800 К.

Методика эксперимента. Композиционные материалы системы алмаз–карбид кремния–стекло получали холодным прессованием шихты с последующим спеканием брикета при 800–1025 К. Концентрацию алмазного порошка в композиционном материале варьировали в интервале 100–150 отн. %. В качестве связующего использовали порошок стекла фракции -10 мкм. Давление холодного прессования брикетов составляло 100–150 МПа. Алмазобразивный инструмент формы 1A1 получали совмещением алмазосодержащего слоя (в форме кольца) с корпусом. Шлифование сверхтвердых материалов (алмаза размерно-весовой группы -12–+11) проводили на станке ШП-3, используемом в гранильном производстве. Скорость вращения инструмента (150 x 5 x 6 x 32) составляла 200 об./мин., скорость вращения кристалла алмаза – 7000 об./мин. Шлифование кристаллов алмаза осуществляли по упругой схеме с постоянным давлением 4 МПа.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Микроструктура композиционных материалов алмаз–карбид кремния–оксидное стекло зависит от концентрации легкоплавкого стекла, условий прессования и спекания (рис. 1).



а)



б)

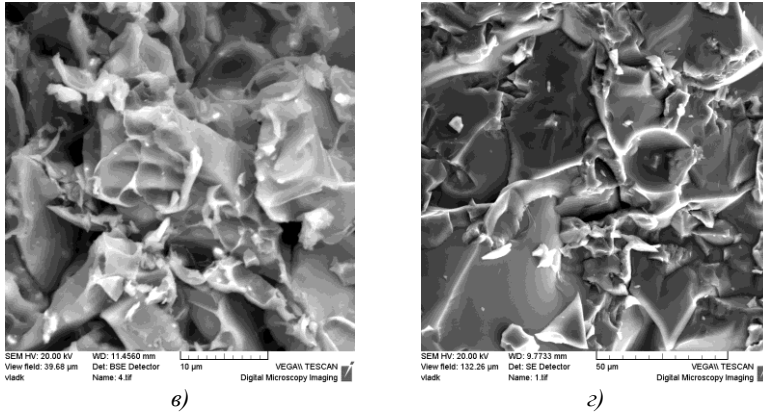


Рис. 1. Микроструктура композиційних матеріалів системи SiC–стекло ($\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$). Концентрація зв'язуючого, об. %: а – 10; б – 20; в – 30; г – 40

Анализ изменения микроструктуры связок (композиционного материала карбид кремния–оксидное стекло) показывает, что микроструктура связки изменяется с увеличением концентрации стекла. При концентрации связующего 10–15 об. % микроструктура композиционного материала является каркасом из частиц карбида кремния, в котором межчастичные пространства представляют собой открытые и закрытые поры. Связующее присутствует в виде пленок на поверхности частиц карбида кремния (рис. 1 а, б). Увеличение концентрации связующего в шихте связки композиционного материала приводит к формированию микроструктуры, характерной для дисперсно-упрочненных композиционных материалов [7–10]: образуется сплошная матрица из связующего (40–50 об. % связующего). В области концентраций связующего 30–40 об. % формируются промежуточные структуры.

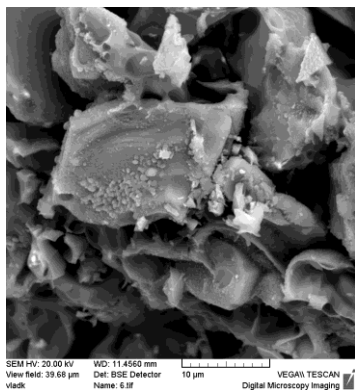
Структура композиционного материала типа «объемный каркас частиц карбида кремния» превращается в структуру «дисперсные частицы–поры–матрица» (20–30 об. % связующего). Поры в этой структуре изолированы друг от друга прослойками связующего в межчастичных пространствах, дисперсные частицы (карбид кремния) разделены прослойками связующего и порами.

В области давлений холодного прессования шихты карбид кремния–оксидное стекло остаточная пористость брикета составляла 30–45 об. %. В процессе спекания брикет уплотнялся и пористость

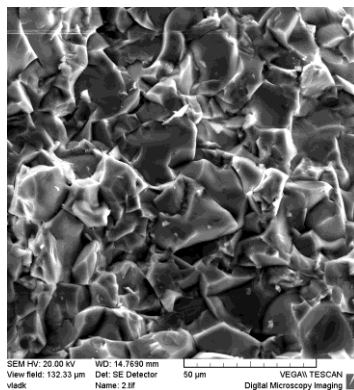
снижалась до 10–30 об. % в зависимости от объемного содержания связующего и температуры спекания (рис. 2).

Характер изменения микроструктуры композиционных материалов системы карбид кремния–легкоплавкое стекло показывает, что увеличение температуры спекания влияет на микроструктуру (рис. 2).

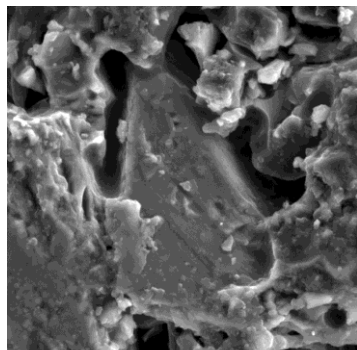
При низких (700–775 К) температурах спекания, незначительно превышающих температуру начала растекания стекол, сплошные пленки стекол на поверхности частиц карбида кремния происходит вследствие пластической деформации капель и частиц стекла между отдельными частицами карбида кремния (рис. 2, а). Формирование пленок на поверхности частиц карбида кремния происходит при 875–1025 К (рис. 2, б–г). Поры в композиционном материале формируются в межчастичных пространствах. Однако при температуре спекания 1025 К поры присутствуют и в пленках стекла на поверхности частиц карбида кремния (рис. 2, г). Существование оксидного стекла в композиционном материале в форме пленок на поверхности частиц карбида кремния–алмаза свидетельствует о взаимодействии оксидного расплава с поверхностью частиц карбида кремния и алмаза (рис. 3).



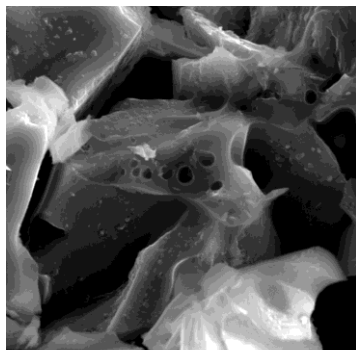
а)



б)



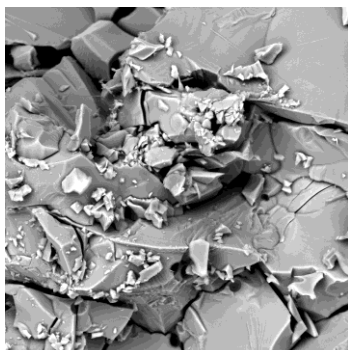
в)



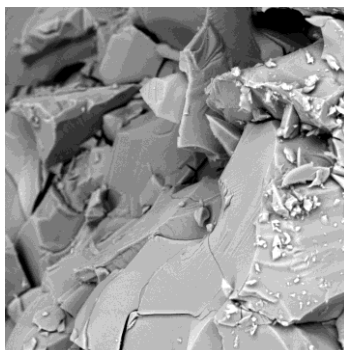
г)

Рис. 2. Влияние температуры спекания шихты карбид кремния–оксидное стекло на микроструктуру композиционных материалов. Концентрация стекла в шихте 30 об. %. Длительность спекания 1 час.

Температура спекания, К: а – 775; б – 875; в – 975; г – 1025



а)



б)

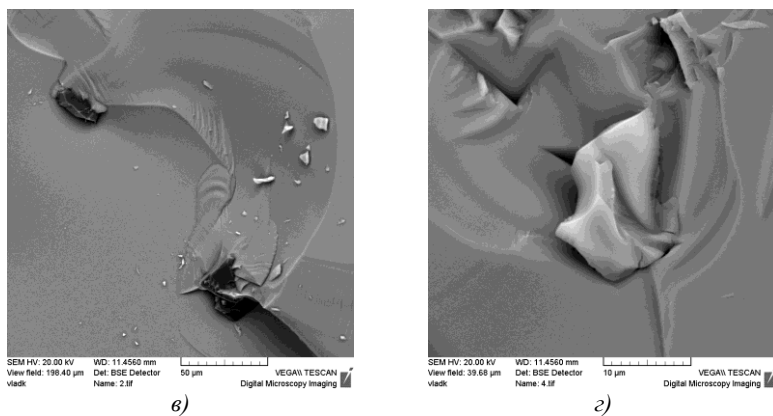


Рис. 3. Морфология поверхности излома композиционных материалов карбид кремния–стекло (а, б) и алмаз–стекло (в, г).

Температура спекания 825 К.

Концентрация стекла в композиционном материале, об. %:

а, в – 30; б, г – 40

Взаимодействие оксидного расплава с частицами карбида кремния и алмаза должно сопровождаться окислением алмаза и карбида кремния. Окисление частиц алмаза и карбида кремния сопровождается образованием оксида углерода, выделение которого должно приводить к образованию пор в пленках стекла. Однако образование пор в пленках стекла отмечается только в композиционных материалах карбид кремния–стекло, спеченных при 1025 К (рис. 2, з). Отсутствие явно выраженных признаков химического взаимодействия (газовых пузырей, пор в пленках стекла, разрушения пленок стекла) оксидных расплавов с частицами алмаза и карбида кремния при спекании композиционных материалов, образование устойчивых, без поверхностных дефектов, пленок стекла на частицах алмаза и карбида кремния показывает, что процессы взаимодействия оксидного расплава с частицами алмаза и карбида кремния ограничены стадией адгезионного взаимодействия (смачивания и растекания расплава по поверхности частиц твердой фазы, рис. 1–3).

Последующее развитие процесса взаимодействия оксидного расплава с поверхностью частиц алмаза и карбида кремния подавлено образованием на поверхности частиц вязкого слоя продуктов окисления (восстановления): нестехиометрических оксидов цинка, фосфора, оксида кремния.

В области температур спекания шихты 875–1025 К физико-механические характеристики связок системы карбид кремния–стекло определяются концентрацией стекла (табл. 1).

Таблица 1

Влияние концентрации стекла на твердость и предел прочности при сжатии композиционных материалов карбид кремния–стекло. Температура спекания 1025 К, давление холодного прессования 150 МПа

Концентрация стекла в шихте, об. %	10	15	20	30	40
Твердость композиционных материалов, HRB	31	52	73	96	95
Предел прочности при сжатии, МПа	280	350	580	710	740

Увеличение значений твердости и предела прочности композиционных материалов карбид кремния–стекло при повышении концентрации стекла в шихте обусловлено снижением пористости (рис. 3). Характер изменения значений твердости и предела прочности при сжатии в области концентраций стекла в композиционных материалах 30, 40 об. % показывает, что физико-механические характеристики композиционных материалов определяются площадью границ стекло–карбид кремния (табл. 1).

Характер морфологии поверхностей износа композиционных материалов алмаз–карбид кремния–стекло показывает, что алмазные зерна прочно закреплены в связке (рис. 4). Прочное закрепление алмазных зерен в связке обеспечивается прослойками стекла между частицами карбида кремния и пленками стекла на поверхности алмаза.

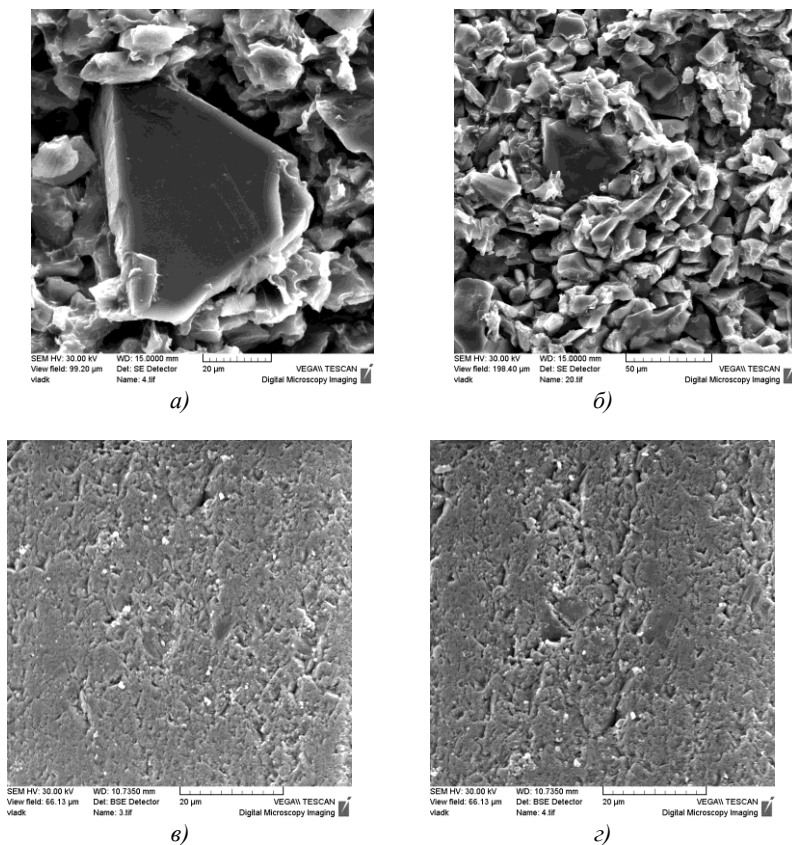


Рис. 4. Морфология поверхностей износа композиционных материалов (а, б) и кристаллов алмаза (в, г) после шлифования. Концентрация стекла (а, б) 30 об. %; пористость, об. %: а – 10; б – 20

Износ связки протекает в результате выкрашивания отдельных частиц карбида кремния. Об этом свидетельствуют открытые поры на поверхности износа (рис. 4, а, б). Подобный механизм износа приводит к образованию в процессе шлифования алмаза сглаженных (без выступов и впадин) микрорельефов на поверхности алмазосодержащих композиционных материалов и повышению качества обработанной поверхности.

Поверхность частиц карбида кремния не изношена, на них отсутствуют площадки износа. В то же время, площадки износа присутствуют на поверхности частиц алмаза (рис. 4). Разрушение связки протекает, в основном, в результате хрупкого разрушения прослоек стекла

и выкрашивания частиц карбида кремния. Из связки выкрашиваются преимущественно те частицы, которые граничат с порой, либо поры расположены в прослойке стекла (рис. 4, б). Производительность шлифования сверхтвердых материалов будет определяться пористой структурой связки и концентрацией в ней оксидного стекла.

Вывод. Прочностные характеристики алмазосодержащих композиционных материалов, определяющие их эксплуатационные показатели, при прочих равных условиях зависят от физико-механических свойств компонентов связки. Изменения физико-механических характеристик связок композиционных материалов может достигаться не только увеличением (уменьшением) концентрации высокопрочных компонентов, но и изменением микроструктуры связки. Присутствие связующего (оксидного стекла) в виде пленок на поверхности частиц карбида кремния позволяет формировать высокопористые и одновременно высоконаполненные композиционные материалы. Физико-механические характеристики таких композиционных материалов зависят от характера и степени взаимодействия стекла с карбидом кремния (наполнителем).

Список использованной литературы:

1. *Захаренко И.П.* Алмазные инструменты и процессы обработки / *И.П. Захаренко*. – К. : Техника, 1980. – 215 с.
2. *Лупинович Л.М.* Опыт применения полимерных материалов в абразивной промышленности / *Л.М. Лупинович, Х.Л. Мамин*. – М. : Наука, 1993. – С. 4–16.
3. Оптимизация свойств связок на основе фенолформальдегидной смолы / *Е.В. Рудман, А.Е. Горбунов, В.М. Копылов, Н.Д. Симонов-Емельянов* // Повышение эффективности применения алмазных инструментов. – М., 1986. – С. 77–86.
4. Эффективная заточка резцов с эльбором на плоскошлифовальных станках серийного производства / *Г.Д. Злочевский, С.В. Парсегов, Ю.М. Зубарев, Е.Е. Липскерова* // Повышение эффективности применения алмазных инструментов. – М., 1986. – С. 100–111.
5. *Злочевский Г.Д.* Влияние технологии переработки на свойства полимерного связующего и алмазосодержащей системы с высоким коэффициентом наполнения / *Г.Д. Злочевский, В.А. Сергеев, В.К. Шитиков* // Перспективные направления применения алмазного инструмента в машиностроении. – М., 1991. – 100 с.

6. Пащенко А.А. Инструмент из сверхтвердых материалов на керамических связках / А.А. Пащенко. – К. : Наукова думка, 1980. – 143 с.
7. Брандон Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д.Брандон, У.Каплан. – М. : Техносфера, 2004.
8. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полушин и др. – М. : Техносфера, 2009.
9. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ : в 2-х кн. / Дж.Гоулдстейн и др. – М. : Мир, 1984.
10. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Ф.Морис и др. – М. : Metallurgia, 1985.

КУЗЕЙ Анатолий Михайлович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь.

Научные интересы:

- алмазобразивный инструмент;
- композиционные материалы с керамическими, металлическими, полимерными матрицами;
- дисперсноупрочненные сплавы алюминия.

Тел.: 375–17–2637190.

E-mail: anatkuzei@mail.ru.

КУДРИЦКИЙ Владимир Григорьевич – научный сотрудник, Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь.

Научные интересы:

- сканирующая электронная микроскопия;
- элементный анализ и трибохимические свойства композиционных материалов и дисперсноупрочненных сплавов.

Тел.: 375–232–774635.

E-mail: vladukas@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 08.07.2015