

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // «Машиностроение», Республ. межведомств. сборн. науч. труд., вып. № 31, 2018. – С. 37–48.
2. Большаков, А. Н. Повышение эффективности торцового фрезерования изменением условий резания при выходе зуба из зоны обработки : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Большаков. – Орел, 2014. – 16 л.
3. Бутыгин В. Б., Демидов А. С. Рациональное использование твердосплавного инструмента при прерывистом точении стали. Известия Самарского науч. центра РАН. 2011. Т.13. №1(3). С. 541–543.
4. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. РБ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Оpubл. 30.06.2017.
5. Zhigalov, A. N. Improved Hard Alloys for Efficient Milling / A. N. Zhigalov, A. R. Maslov, A. R. Shaturov // Russian Engineering Research. – 2015. Vol. 35, No. 11, с. 818–821.
6. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник. / А. А. Маталин — СПб: издательство «Лань». 2010. – 512 с.
7. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов. / В. К. Старков — Москва: Машиностроение, 2009. – 640 с.

УДК 539.2: 658.562

Шелег В.К.<sup>1</sup>, Жорник В.И.<sup>1,2</sup>, Сеньюк В.Т.<sup>2</sup>, Ковалева С.А.<sup>2</sup>, Хомич Н.С.<sup>3</sup>

### КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

### НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ

### ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

*1. Белорусский национальный технический университет*

*2. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси*

*3. РУП «Полимаг»*

*Минск, Беларусь*

*На основе импактных алмазов и наномеханокомпозита Fe-Ti получен сверхтвердый полифазный (алмаз–лонсдейлит) материал с мультимодальной нано- и микроуровневой структурой и повышенной адгезией алмазных зерен к связке. За счет использования в качестве связки наномеханокомпозитов системы Fe-Ti спекание материала на основе импактных алмазов осуществляется в диапазоне давлений 2–4,5 ГПа, что на 30–50 % ниже, чем для композитов на основе синтетических алмазов. Технологические испытания показали, что использование импактных алмазов позволяет повысить в 1,5–2 раза абразивную способность инструмента и увеличить более чем в 2 раза длительность его эксплуатации при обработке кремниевых пластин по сравнению с инструментом на основе синтетических алмазов.*

Абразивный алмазный инструмент широко используется на шлифовальных и точных операциях при обработке твердого сплава, керамики, стекла и других материалов. Актуальными задачами в области создания абразивного алмазного инструмента являются повышение их стойкости и режущей способности, что в значительной степени обусловлено свойствами алмазного зерна и прочностью удержания последнего в связке.

Традиционно используемые для этих целей порошки синтетического алмаза имеют достаточно низкий порог графитизации, обусловленный наличием примесей металлов-катализаторов. Еще одна проблема состоит в значительной хрупкости шлиф- и микропорошков синтетического и природного алмаза, что приводит к скалыванию режущей кромки, ухудшению качества поверхности обрабатываемого материала и преждевременному выходу из строя алмазного инструмента. В этой связи представляется перспективным использование в качестве альтернативного алмазного сырья наноструктурированных микро- и шлифпорошков импактных алмазов Попигайского месторождения (Россия), имеющих кубическую и гексагональную решетки и характеризующихся отсутствием катализаторов графитизации [1].

Импактные алмазы или как их еще называют алмаз-лонсдейлитовый абразив (АЛА) – новый вид минерального сырья, который пока не представлен рынке, а между тем они характеризуются уникальными технологическими свойствами, в первую очередь, высокой абразивной способностью, в 1,5–2 раза превосходящей абразивную способность природных технических и синтетических алмазов. Данное качество обусловлено особенностью структуры импактных алмазов. Они представляют собой наноструктурированный композит алмазной и лонсдейлитовой фаз. Благодаря композиционной наноструктуре АЛА имеют преимущество перед обычными алмазами, частицы которых представляют собой монокристаллы. В настоящее время уже искусственно синтезированы небольшие образцы аналогичных алмазных поликристаллов, которые также имеют высокую абразивную способность. Но синтез такого материала крайне затруднителен, тогда как Попигайское месторождение является неисчерпаемым источником наноструктурированных алмазных поликристаллов, и добыча данного сырья позволит обеспечить все потребности в нем на длительную перспективу [2]. Перспективным является также использование импактных алмазов в качестве полировального материала в процессах формирования нанорельефа прецизионных поверхностей хрупких неметаллических материалов, что позволит значительно повысить производительность обработки и качество деталей электронной, оптической и лазерной техники [3].

Целью данной работы является разработка композиционного материала инструментального назначения на основе импактных алмазов для финишной обработки труднообрабатываемых материалов различного назначения (металлы, сплавы, керамика и др.).

В качестве исходного материала для получения композита использовался порошок импактных алмазов Попигайского кратера с размерами поликристаллических зерен в пределах 40–400 мкм. Для сравнения также исследовались порошки наноалмазов детонационного синтеза (ультрадисперсный алмаз, УДА) производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск) с размером частиц 4–10 нм (ТУ РБ 28619110.001-95), а также шлифпорошок алмаза статического синтеза АСМ 160/120 и микропорошки алмазов АСМ 14/10, АСМ 20/14 и АСМ 60/40 производства ЗАИ ПО «Кристалл» (г. Гомель) с размером частиц в диапазоне 10–160 мкм (ГОСТ 9206-80). Модифицирование порошков импактных алмазов осуществлялось методом химико-термической обработки в восстановительной атмосфере, содержащей метастабильные галогениды титана и кремния [4, 5]. Термобарическая обработка модифицированных порошков проводилась в аппарате высокого давления (АВД) типа «наковальня с лункой» в диапазоне давлений 2,5–5,5 ГПа при температуре 1200–1900 °С в течение 30–60 с.

Внешний вид порошков исследовался на оптическом микроскопе «Микро-200» (ПО «Планар», Беларусь). Определение удельной поверхности порошков проводилось методом BET на анализаторе площади поверхности и размера пор SA 3100 фирмы «BECKMAN COULTER» (США). Анализ гранулометрического состава выполнялся с помощью автоматического анализатора изображения «Mini-Magiscan» фирмы «Joosse Loebl» (Англия) по программе «Автоскан». Морфология поверхности и излома спеченных образцов исследовалась на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 (ОДО

«МикроТестМашины», Беларусь) в контактном режиме. Микроструктура полученных алмазных материалов изучалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с разрешающей способностью 1,7 нм (при 30 кВ) и 2,0 нм (при 20 кВ). Рентгеновские исследования порошков выполнены на дифрактометре фирмы «Bruker» D8 ADVANCE в Cu-K $\alpha$  излучении. Микротвердость наноструктурных композитов определялась на микротвердомере Micromet-II (фирма «Buehler», Швейцария) алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 100 г.

Частицы импактных алмазов имеют разнообразную форму (рис. 1) и морфологию поверхности (рис. 2).

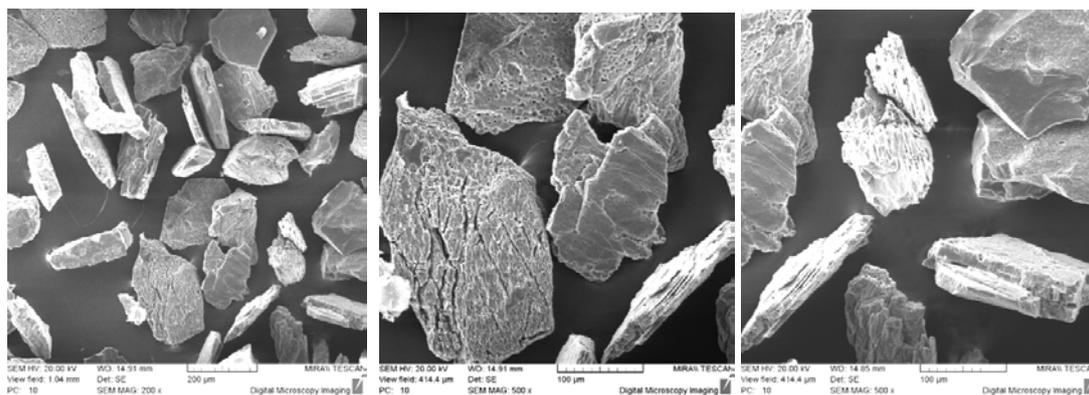


Рис. 1. Форма частиц импактных алмазов

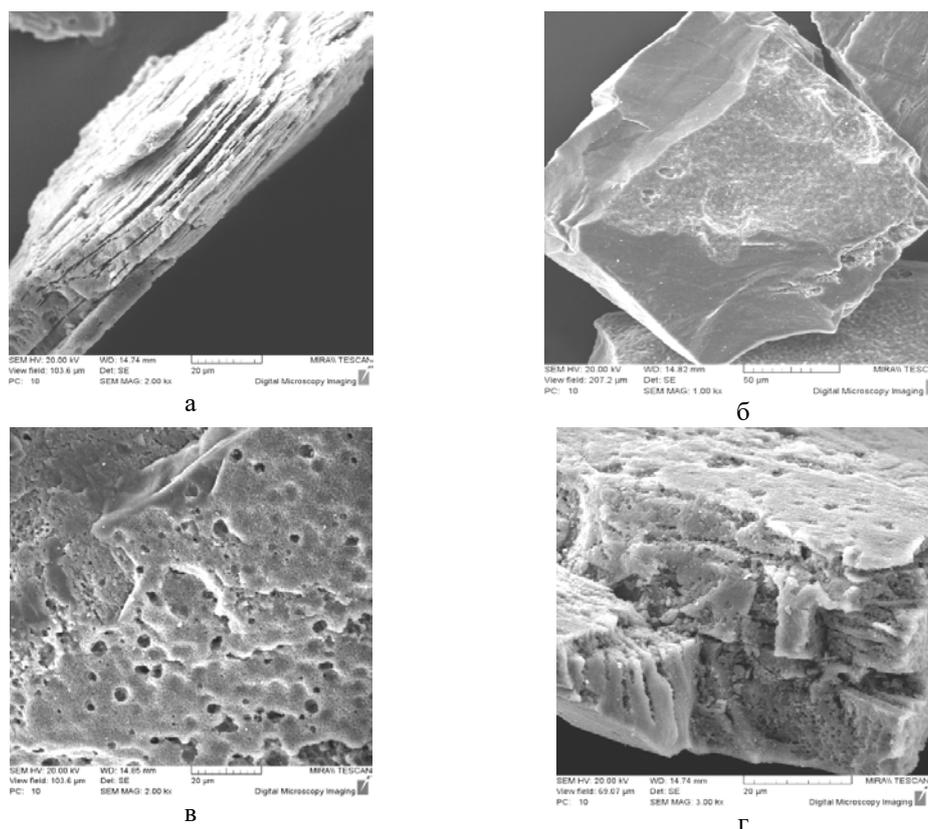


Рис. 2. Морфология поверхности частиц импактных алмазов:  
*а* – слоистая; *б* – сглаженная; *в* – пористая; *г* – осколочная

Проведенные измерения удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) исходных порошков АЛА зернистостью от 40 до 400 мкм показали, что их удельная поверхность находится в

пределах 0,7–0,8 м<sup>2</sup>/г. Сравнение полученных результатов с данными измерений  $S_{уд}$  порошков синтетических алмазных порошков марки АСМ показали, что удельная поверхность импактных алмазов на порядок выше  $S_{уд}$  шлифпорошка АСМ 160/120 ( $S_{уд} = 0,06$  м<sup>2</sup>/г), и в 2–5 раз выше, чем у значительно более дисперсных микропорошков АСМ (например, у микропорошка АСМ 14/10 удельная поверхность  $S_{уд} = 0,42$  м<sup>2</sup>/г, а у микропорошка АСМ 60/40 –  $S_{уд} = 0,15$  м<sup>2</sup>/г), что может свидетельствовать о развитости поверхности и, соответственно, высокой адсорбционной способности импактных алмазов, и это может определять высокую эффективность процесса модифицирования данной разновидности алмазного сырья [4].

Перед спеканием импактных алмазов проводилось их модифицирование, заключающееся в осаждении активирующей добавки в виде покрытия островкового типа на поверхность алмазного порошка [4, 5]. В качестве модификаторов использовались порошки кремния и титана. Кремний обладает хорошей жидкотекучестью в расплавленном состоянии и при высоких температурах реагирует с углеродом с образованием карбида кремния, который характеризуется высокой твердостью и обладает близким к алмазу коэффициентом термического расширения [6]. Титан хорошо смачивает поверхность алмаза и способствует лучшему удержанию алмазных зерен в связке. Предварительный отжиг порошков импактного алмаза с порошками кремния и титана проводили в контейнере из нержавеющей стали в восстановительной атмосфере, содержащей хлориды кремния или титана в температурном интервале 800–950 °С.

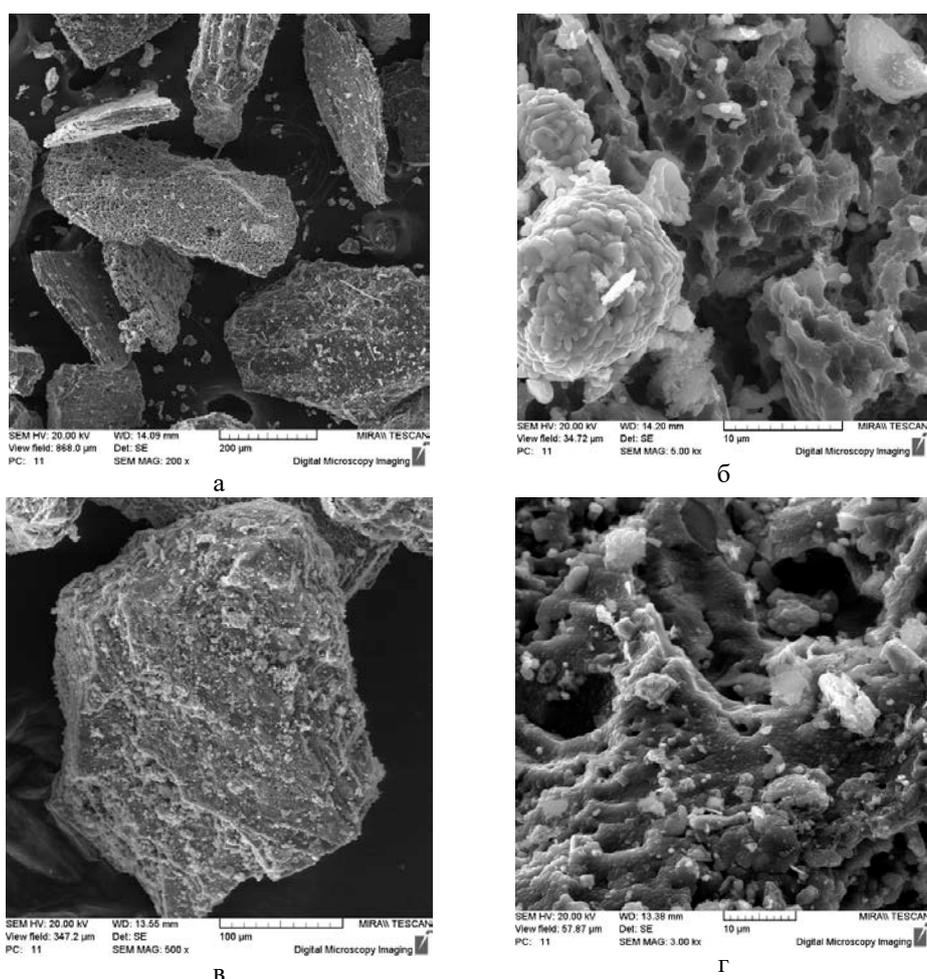


Рис. 3. Частицы импактного алмаза после модифицирования титаном (а, б) и кремнием (в, г): общий вид (а, в); участок поверхности алмазного зерна с покрытием (б, г)

Поверхность модифицированных титаном зерен импактных алмазов показана на рис. 3, а, б. Из частиц титана округлой формы размером 70–100 нм образуются агломе-

раты в виде дендритов размером до 10 мкм, покрывающие отдельные участки алмазных зерен, а также наблюдаются более дисперсные агломераты до 2 мкм на основе соединений титана в микропорах на поверхности частиц алмаза (рис. 3, б). Кремний на поверхности зерен импактного алмаза находится в виде отдельных частиц размером до 5 мкм, образующих покрытие островкового типа (рис. 3, в, г). Однородность покрытия зерен импактного алмаза при этом существенно выше, чем для микропорошков синтетического алмаза марки АСМ [4, 7].

Термобарическую обработку импактных алмазов после модифицирования выполняли в АД «наковальня с лункой» при давлениях 2,5 и 5,5 ГПа при температуре от 1200 до 1900 °С. В качестве среды, передающей давление, служил контейнер из литографского камня, внутри которого помещался трубчатый графитовый нагреватель с исследуемым материалом. Для сравнения в этих же условиях спекали также порошки УДА и порошок синтетического алмаза АСМ фракции 20/14.

В результате установлено, что графитизация порошка УДА при указанных давлениях спекания начинается при температуре 1000 °С при выдержке в течение 15 с. Порошки синтетического алмаза АСМ начинают заметно графитизироваться при более высокой температуре спекания порядка 1450–1500 °С и при выдержке свыше 30 с. Импактные алмазы проявляют наиболее высокую устойчивость против графитизации при указанных давлениях спекания. Так, спеченный в условиях, при которых происходит практически полная графитизация УДА и значительная графитизация спека из порошка АСМ, материал на основе импактных алмазов не графитизировался. Установлено, что температура спекания порошка импактных алмазов без заметной графитизации превышает температуру спекания используемого порошка АСМ на 200–250 °С, а порошков УДА – более, чем на 400 °С.

Далее изучалась возможность получения наноструктурного алмазосодержащего материала для магнитно-абразивной обработки (МАО) путем спекания модифицированных титаном импактных алмазов со связкой на основе наноструктурированного механокомпозита Fe-20 % Ti [8]. Спекание материала проводилось при давлении 1,5–4,5 ГПа в АД типа «трапеция» в диапазоне температур 1250–1450 °С. Данные о составе шихты, режимах спекания и свойствах композита представлены в табл. 1.

**Таблица 1 – Состав шихты, режимы получения и свойства наноструктурированного композиционного материала на основе импактных алмазов с добавками наномеханокомпозитов системы Fe-Ti**

№ п/п	Состав шихты, масс.%						Режимы получения			Свойства композита			
	TiN	TiB2	Fe-Ti	Импакт-алмаз	Si	Ti	P, ГПа	T, оС	t, с	Пористость, %	Термостойкость, оС	Твердость матрицы HV, ГПа	Твердость СТМ HV, ГПа
1	-	15	45	35	5	-	3,5	1250	45	< 1	1270	6,6	22
2	-		50	50	-	-	4,5	1450	30	< 1	1260	7	30
3	10		40	50	-	-	1,5	1300	45	< 1	1200	8	18
4	-	15	40	40	-	5	2,5	1350	50	< 1	1260	7,7	25

В результате термобарического спекания были получены компактные цилиндрические образцы диаметром 10 и высотой 8 мм. На рисунке 4 приведены изображения

В результате термобарического спекания были получены компактные цилиндрические образцы диаметром 10 и высотой 8 мм. На рисунке 4 приведены изображения структуры спеченного композиционного материала «импактный алмаз – механокомпозит Fe-20 % Ti» при различном увеличении, анализ которых показывает, что в процессе термобарического спекания происходит дробление крупных частиц импактного алмаза и упрочнение материала металлической связки его мелкими осколками.

Результаты рентгеноспектрального (рис. 5) и рентгенофазового анализов показывают, что титан равномерно распределен по объему матрицы, а вблизи поверхности алмазных частиц формируются карбиды титана, обеспечивающие прочное удержание алмазных частиц в металлической матрице.

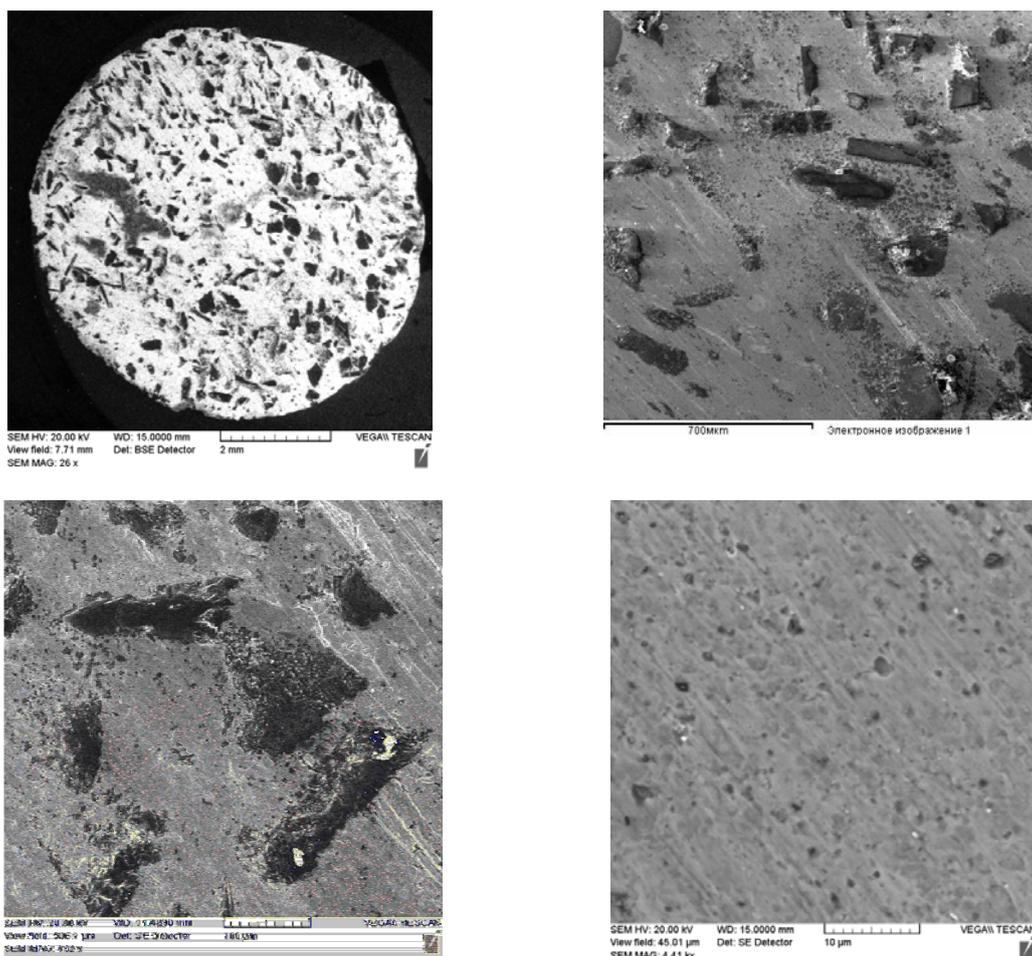


Рис. 4. Микроструктура композита «импактный алмаз – связка (Fe-Ti)» при различном увеличении

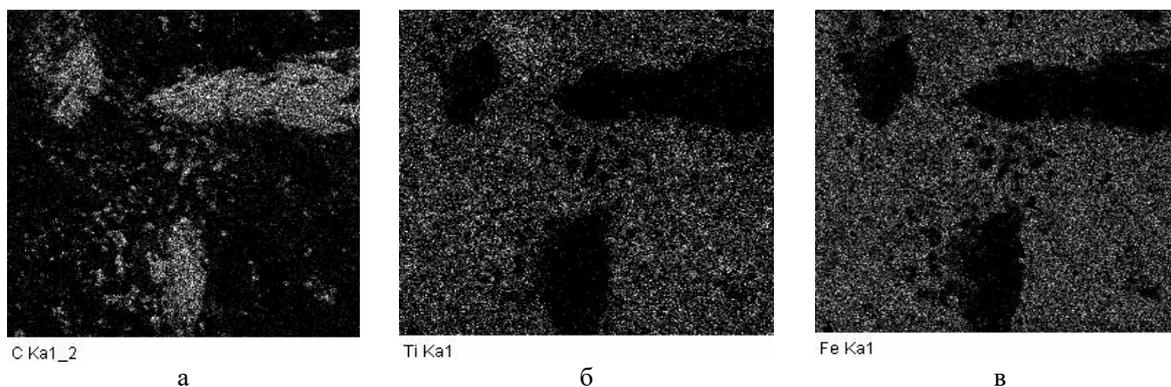


Рис. 5. Характер распределения различных элементов (а – С, б – Ti, в – Fe) по сечению композита «импактный алмаз – связка (Fe-Ti)»

но, что крупное зерно импактного алмаза (в центре) окружено металлической матрицей Fe-Ti и прочно удерживается в ней.

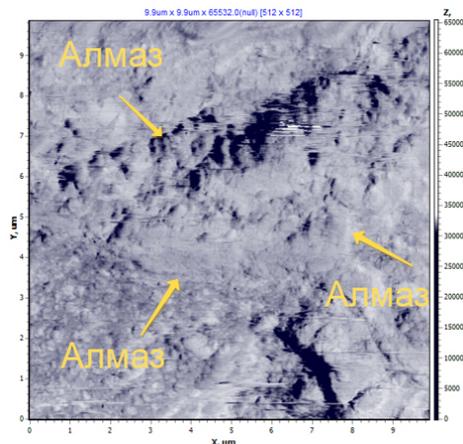


Рис. 6. АСМ-изображение топографии излома спека композита «импактный алмаз – связка (Fe-Ti)»

Анализ физико-механических свойств полученных образцов материала позволяет сделать вывод, что достигнутый уровень физико-механических параметров алмазного нанокompозита позволяет использовать его в абразивном инструменте для финишной обработки высокотвердых материалов [9].

Полученные спеки на основе композита «импактный алмаз – связка (Fe-Ti)» размалывался в планетарной мельнице до состояния порошка, состоящего из алмазосодержащих гранул в диапазоне размеров 5–50 мкм. Для сравнительных испытаний по подобной технологической схеме была приготовлена также партия ферро-абразивного материала такого же гранулометрического состава с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 20/14. Полученные абразивные составы использовались для магнитно-абразивной обработки пластин кремния. Данные сравнительных испытаний приведены в таблице 2 и на рис. 7.

Таблица 2 – Результаты сравнительных испытаний алмазных композитов

Характеристика композиционного порошка		Обрабатываемый материал	Удельный съём материала, мг/мин	Стойкость, мин
состав	соотношение компонентов			
Fe-Ti /импакт-алмаз	5/50	кремний	35,4	> 30
Fe-Ti/АСМ	5/50	кремний	17,8	14

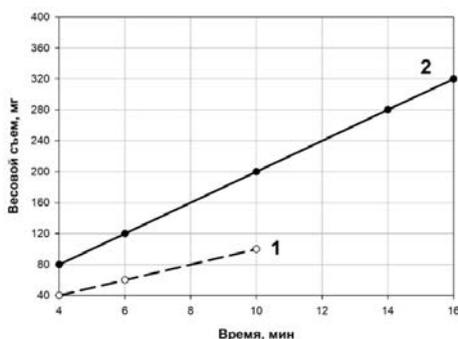


Рис. 7. Стойкость алмазных композитов на основе алмазов АСМ (1) и импактных алмазов (2) на операции обработки пластин кремния

Из полученных данных видно, что абразивный состав на основе импактных алмазов при магнитно-абразивной обработке пластин кремния обладает в 1,5–2 раза более

высокой абразивной способностью и более чем в 2 раза более высокой стойкостью по сравнению с составом на основе алмаза АСМ.

Т. о., установлено, что значения  $S_{уд}$  импактных алмазов достигает 0,7–0,8 м<sup>2</sup>/г, что в 2 раза выше, чем у более дисперсных микропорошков АСМ и существенно (более чем на порядок) превышает  $S_{уд}$  синтетических алмазов статического синтеза той же зернистости. Развитость поверхности и связанная с ней высокая адсорбционная способность наряду с особенностями структуры данных классов порошков алмаза позволяют рассматривать их в качестве перспективного сырья для получения широкой гаммы алмазных материалов и инструмента на их основе.

Импактные алмазы проявляют наиболее высокую устойчивость против графитизации при спекании в условиях высоких давлений и температур. Установлено, что температура спекания порошка импактных алмазов без заметной графитизации при давлениях 2,5–5 ГПа превышает температуру спекания используемого порошка АСМ на 200–250 °С, а порошков УДА – более, чем на 400 °С.

Использование химико-термического модифицирования импактных алмазов кремнием и титаном позволяет получать композиционные порошки импактного алмаза, обеспечивающие повышенное алмазоудержание в матрице.

На основе импактных алмазов и наномеханокомпозита Fe-Ti получен сверхтвердый полифазный (алмаз–лонсдейлит) материал с мультимодальной нано- и микроуровневой структурой и повышенной адгезией алмазных зерен к связке. Показано, что за счет использования в качестве связки наномеханокомпозитов системы Fe-Ti спекание материала на основе импактных алмазов осуществляется в диапазоне давлений 1,5–4,5 ГПа, что на 30–50 % ниже, чем для композитов на основе синтетических алмазов марки АСМ [10].

Применение импактных алмазов позволяет повысить в 1,5–2 раза абразивную способность рабочей среды при магнитно-абразивной обработке и увеличить более чем в 2 раза ее стойкость при обработке кремниевых пластин по сравнению с рабочей средой на основе синтетического алмаза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь, П. А. Алмазные и углеродсодержащие композиционные материалы и покрытия: получение, свойства, применение / П. А. Витязь, В. Т. Сенють, В. П. Афанасьев // Материалы II-й Международной конференции молодых ученых, работающих в области углеродных материалов: сб.тез.докл. (Москва, г. Троицк, 29–31 мая 2019 г.). – Москва, г. Троицк: ТИСНУМ, 2019. – С. 74–75.
2. Афанасьев, В. П., Похиленко, Н. П. Попигаевские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий, Инноватика и экспертиза, 2013, Выпуск 1 (10), С. 8–15.
3. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
4. Витязь, П. А. Структурные особенности алмазных порошков после поверхностного модифицирования активаторами спекания / П. А. Витязь, В. Т. Сенють, В. И. Жорник, А. М. Парницкий, Т. В. Гамзалева // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – № 1(30). – С. 62–73.
5. Сенють, В. Т. Изучение структуры поликристаллов на основе алмазных микропорошков после модифицирования карбидообразующими элементами [Текст] / В. Т. Сенють, В. И. Жорник, А. М. Парницкий, И. В. Валькович // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2016. – Т.59. – №.8. – С.60–63.
6. Ковалевский, В. Н., Гордеев С. К., Корчагина С. Б., Фомихина И. В., Жук А. Е. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – №5 – С. 8–14.
7. Сенють, В. Т. Термобарическое спекание модифицированных кремнием и титаном алмазных микропорошков / В. Т. Сенють, В. И. Жорник, А. М. Парницкий, Е. И. Мосунов,

А. В. Дудан // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – №3. – С. 89–93.

8. Григорьева, Т. Ф. Морфологические характеристики механохимически полученных композитов Fe/Ti / Т. Ф. Григорьева, С. А. Ковалева, Т. Ю. Киселева, С. В. Восьмериков, Е. Т. Девяткина, Э. А. Пастухов, Н. З. Ляхов // Расплавы. – 2016. – № 3. – С. 269–276.

9. Структура и свойства композиционного ферроабразивного порошка для магнитно-абразивной обработки, полученного методом СВС / Т. Л. Талако, А. И. Лецко, Ю. А. Реутёнок, Н. С. Хомич О. П. Корогода // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Порошковая металлургия». – 2016. – Вып. № 39. – С. 120–128.

10. Витязь, П. А. Синтез и применение сверхтвёрдых материалов / П. А. Витязь, В. Д. Грицук, В. Т. Сенють. – Минск, Белорусская наука, 2005. – 359 с.