

МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПАКТИТОВ ПОПИГАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В. Т. Сенють¹, П. А. Витязь¹, И. В. Валькович¹, В. П. Афанасьев²,
И. Е. Григорьев³, Н. С. Хомич⁴

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, ул. Академическая, 12, 220072, г. Минск, Беларусь,
e-mail: vseuyut@tut.by

²Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН,
пр-т акад. Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

³Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

⁴УП «Полимаг» ГП «НТП БНТУ Политехник», ул. Сурганова, 37/1, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 22.05.2025 г.

Представлены результаты исследований металломатричных композитов (ММК) инструментального назначения, содержащие импактный алмаз (ИА). Путем термобарической обработки получен композит на основе твердого сплава ВК-8, содержащий 6,25–25,00 об.% ИА, обладающий до 30 раз более высокой износостойкостью по сравнению со спеченным твердым сплавом, не содержащим алмазов. Методом механического сплавления железа с ИА (алмазосодержащей породой тагамит) получены ММК, предназначенные для магнитно-абразивной обработки (МАО) циркониевых сплавов. ММК «железо – ИА» обладают в 1,5–2,0 раза повышенными абразивной стойкостью и временем эксплуатации по сравнению с ММК «железо – синтетический алмаз (АС)». Применение тагамита в составе ММК позволило повысить стойкость и абразивную способность композита для МАО изделий из циркониевого сплава по сравнению с ферроабразивным порошком на основе стального песка СП-17 (Fe – 17 % Si).

Введение. Использование нового вида наноструктурированных алмазов – импактных алмазов (ИА) Попигайского месторождения (Россия) – предполагает существенное повышение эксплуатационных характеристик композиционных алмазосодержащих материалов и инструментов на их основе, в первую очередь из-за их высокой абразивной способности, в 1,5–2,0 раза превосходящей абразивную способность природных технических и синтетических алмазов [1, 2]. С другой стороны, коренная порода тагамит, в которой находятся ИА (содержание до 20 кар/т), состоящая из стекловатой либо слабо раскристаллизованной матрицы, содержит до 63–73 об.% диоксида кремния и до 12,0–14,5 об.% оксида алюминия (корунда), что позволяет использовать ее в качестве высокоэффективного природного абразивного материала [3, 4].

Цель работы – разработка металломатричных композитов (ММК) для камнеобрабатывающего (бурового) инструмента и ММК для маг-

нитно-абразивной обработки (МАО), содержащих ИА либо тагамит, и изучение структуры и свойств полученных ММК.

Методики исследований. ММК на основе твердого сплава ВК-8 изготавливали в виде цилиндров высотой 10 мм и диаметром 10 мм методом термобарической обработки (ТБО) на гидравлическом прессе ДО-138Б с усилием 6,3 МН при давлении 2,5 ГПа и мощности нагрева 0,9–1,1 кВт, что обеспечивало температуру ячейки в интервале 1450–1550 °С. Длительность ТБО образцов составила 60 с.

Внешний вид и структуру спеченных композитов исследовали на оптическом микроскопе МБС-9 (Россия), микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа Микро-200 (ОАО «Планар», Беларусь).

Исследование морфологии и элементного состава образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения JSM-5610 LV с системой химического анализа

EDX JED-2201 (JEOL, Япония) методом микрозондового рентгеноспектрального анализа (МРСА).

Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометре D8 ADVANCE (AXS Bruker) в CuK_α -излучении.

Микротвердость образцов H_μ определяли на микротвердомере ПМТ-3 алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 200 г.

Износостойкость (удельная производительность) твердосплавных ММК ($\text{см}^3/\text{мг}$) определяли как отношение объема (см^3) абразивного шлифовального круга (контртела), снимаемого образцом композита за один цикл испытаний, к величине потери массы композита (мг) при его взаимодействии с абразивным кругом. В качестве контртела был выбран шлифовальный круг марки 63С на основе карбида кремния (зеленый) с размером зерна 200–315 мкм (ИСО 6344-2:1998).

ММК на основе железа получали методом механосплавления (МС) порошка железа ГОСТ ПЖР (ГОСТ 9849-86) размером 160–315 мкм с абразивной составляющей – ИА или алмазосодержащей породой тагамит Попигаевского месторождения после ее диспергирования и отсева по фракциям. МС порошков проводили в планетарной мельнице «Активатор-2S» (Россия) при энергонапряженности 0,3–3,0 Вт/г в течение 10 мин. Содержание ИА или тагамита в шихте составило 30 об.%.

Испытания ММК осуществляли путем МАО трубок из циркониевого сплава $\text{Zr} - 1\% \text{Nb}$ диаметром 20 мм на установке модели Т10 производства УП «Полимаг» (г. Минск, Беларусь) при следующих режимах: частота вращения детали – 500 об/мин; ход индуктора – 40 мм; частота осцилляции – 2 Гц; время обработки образца – 30 мин. Готовили абразивный состав из порции гранул ММК массой 20 г с добавкой СОЖ «Тесматол» в количестве 3 об.%. Шероховатость обработанных образцов определяли с помощью профилометра MarSurf PS1 (Германия).

Матричные композиты «твердый сплав – ИА/тагамит». ММК «твердый сплав – ИА/тагамит» спекали на основе порошка WC-Co с размером частиц менее 40 мкм, который получали путем размолла в атриторе спеченного твердого сплава ВК-8 (ГОСТ 3882-74) (так называемый «вторичный» твердый сплав). Для улучшения спекаемости в исходную шихту добавляли порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 7885-86) в количестве 5 мас.%, а с целью повышения адгезии алмазных зерен к матрице в шихту вводили порошок

карбонильного никеля ПНК в количестве 9 мас.% (ГОСТ 9722-97).

Для изготовления ММК «твердый сплав – ИА» использовали очищенный порошок ИА зернистостью 100/80 мкм, на который методом химико-термического осаждения наносили титановое покрытие [5]. Исходные составы для получения ММК содержали ИА в количестве 6,25; 12,5 и 25 об.%. В шихту для изготовления ММК «твердый сплав – тагамит» вводили порошок тагамита фракции 0–0,1 мм в количестве 25 об.%. Как было показано в [6], тагамит указанной фракции содержит в своем составе до 4 % ИА, а также оксиды кремния (61,7–63,3 %), алюминия (корунда) (14,2–15,4 %) и железа (8,2–9,2 %).

Анализ структуры ММК «ВК-8 – ИА» (рис. 1, б) показал, что образцы с добавкой ИА в количестве 25 об.% (относительная концентрация алмаза – 100 %) характеризуются повышенной дефектностью (на шлифах по торцам наблюдаются протяженные магистральные трещины, макропоры и несплошности в виде раковин).

Снижение содержания добавки ИА с 25 до 12,5 и 6,25 об.% (относительная концентрация – 50 и 25 % соответственно) приводит к снижению дефектности (пористости) материала и способствует повышению однородности его структуры (рис. 1, в, г).

Для ММК, содержащих ИА в указанном диапазоне концентраций, характерно отсутствие микротрещин на границе «алмаз – матрица», чему способствует наличие титанового покрытия на алмазных зернах, обеспечивающих их более высокую адгезию к матрице. ММК «твердый сплав ВК-8 – тагамит» характеризуется мелкозернистой беспористой структурой с равномерным распределением фаз, что может свидетельствовать о плавлении тагамита в процессе ТБО.

Измерение микротвердости образцов методом Виккерса при нагрузке 200 г показало, что H_μ ММК с 25 об.% ИА находится в пределах 4,5–7,5 ГПа, что сравнимо с H_μ материала, не содержащего алмаз (5,5–6,5 ГПа). Уменьшение содержания ИА с 25 до 12,5 об.% ведет к более существенному росту H_μ – до 12–15 ГПа, что связано как со снижением пористости образцов, так и с дисперсным упрочнением ММК мелкими частицами ИА, образующимися при разрушении крупных алмазных зерен [7]. Микротвердость ММК с добавкой тагамита оказалась равной 4,5–5,0 ГПа.

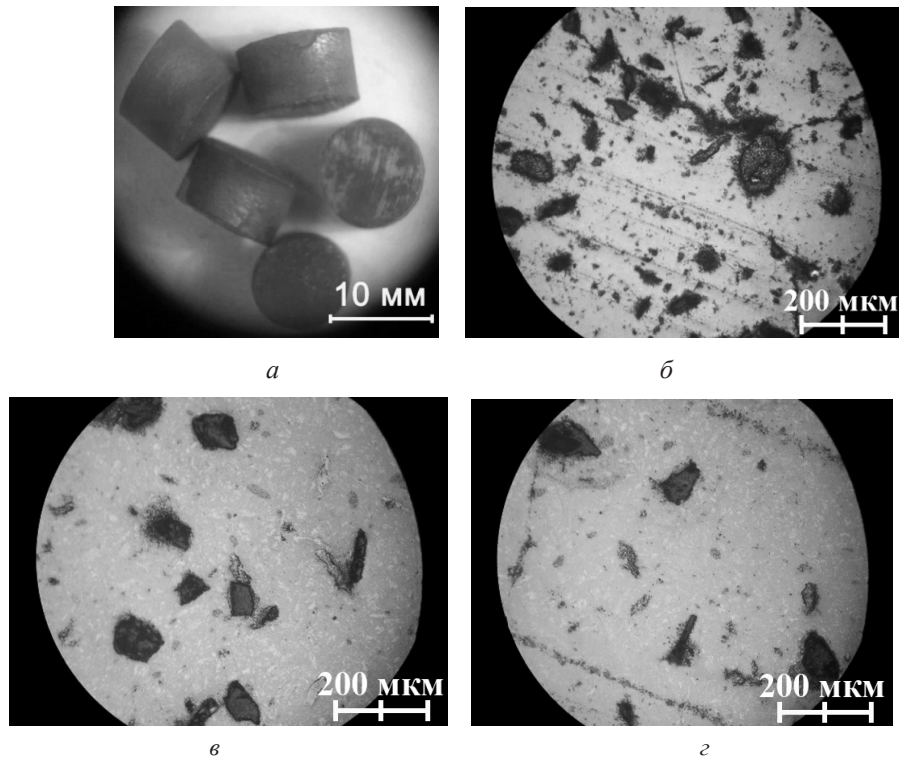


Рис. 1. ММК на основе твердого сплава ВК-8, полученные методом ТБО: *а* – внешний вид образцов ММК; *б* – ММК с 25 об.% ИА 100/80 мкм; *в* – ММК с 12,5 об.% ИА 100/80 мкм; *г* – структура ММК с 6,25 об.% ИА 100/80 мкм

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, основными фазами в полученных образцах являются карбид вольфрама WC и алмаз, при этом графитизации алмаза при данных параметрах ТБО не отмечено (рис. 2).

На рис. 3 представлены данные МРСА, подтверждающие, что в составе связки ММК основными элементами являются углерод (C) и вольфрам (W) (рис. 3, *а*). Наряду с указанными элементами в матрице отмечено наличие кобальта (Co),

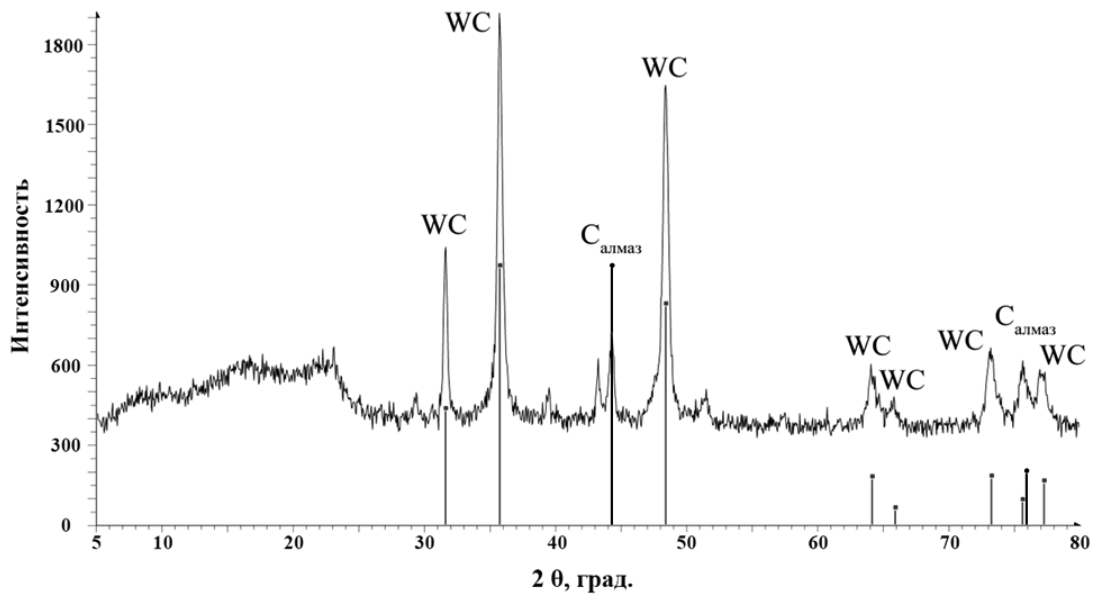


Рис. 2. Дифрактограмма образца ММК «твердый сплав ВК-8 – 12,5 об.% ИА» после ТБО при давлении 2,5 ГПа, температуре 1550 °С, длительности 60 с

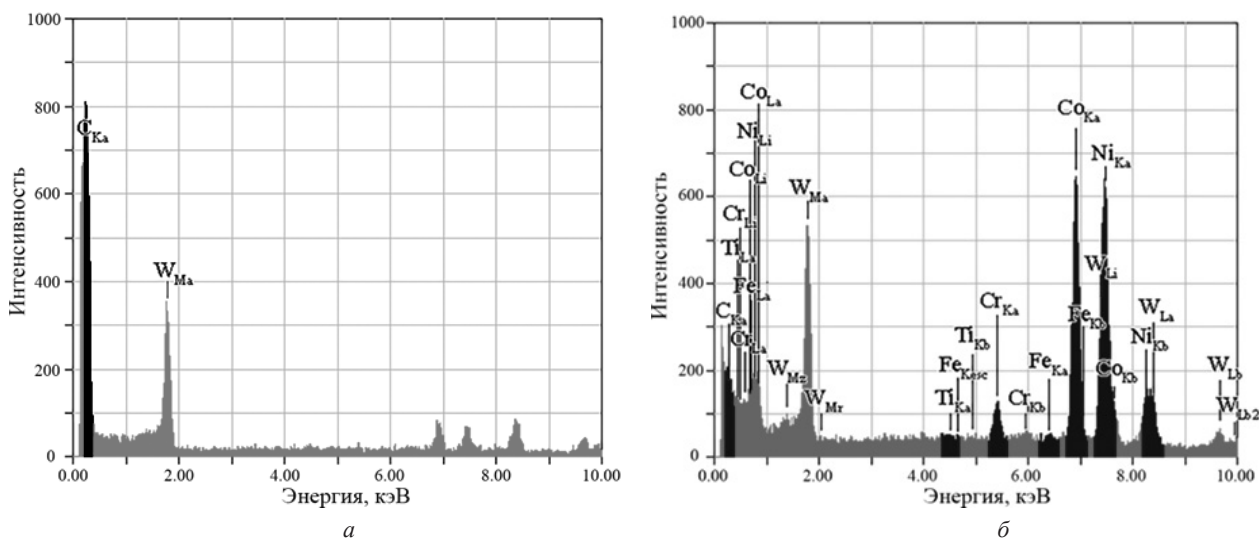


Рис. 3. МРСА образца ММК «твердый сплав ВК-8 – 12,5 об.% ИА» после ТБО при давлении 2,5 ГПа, температуре 1550 °С, длительности 60 с: а – область алмазного зерна; б – матричная область вблизи алмазного зерна

никеля (Ni), титана (Ti), а также примесей железа (Fe) и хрома (Cr) (рис. 3, б), которые, по всей вероятности, попали в шихту в виде намола при получении твердосплавного порошка в процессе размола спеченного твердого сплава.

Результаты испытаний на износостойкость спеченных ММК «твердый сплав ВК-8 – ИА» и ММК «твердый сплав ВК-8 – тагамит» приведены на рис. 4. Наиболее высокой абразивной способностью обладает композит с 12,5 об.% ИА, средняя удельная производительность которого до 30 раз превышает значения данного параметра для твердого сплава без ИА. Увеличение содержания ИА до 25 об.% приводит к снижению

удельной производительности материала в 1,5–1,6 раза по сравнению с ММК, содержащим 12,5 об.% ИА. В этом случае в первые 15–20 с испытаний наблюдается интенсивный съем обрабатываемого материала, однако затем к середине цикла происходит ухудшение абразивных свойств композита вследствие интенсивного выкрашивания алмазных зерен из матрицы и «засаливания» рабочей поверхности образцов ММК.

Снижение интенсивности съема для состава № 2 по сравнению с составом № 3 обусловлено, скорее всего, уменьшением количества режущих алмазных зерен в зоне контакта испытываемого

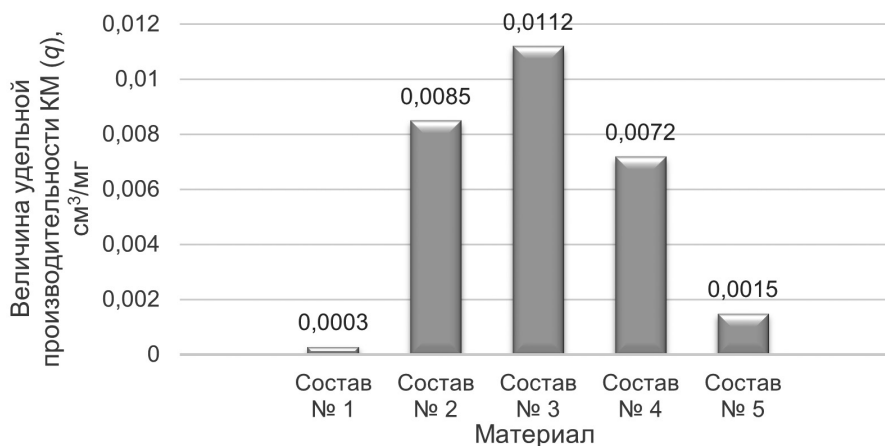


Рис. 4. Результаты сравнительных испытаний образцов ММК «твердый сплав ВК-8 – ИА» и ММК «твердый сплав ВК-8 – тагамит» на удельную производительность (износостойкость): 1 – композит без добавки ИА; 2 – добавка 6,25 об.% ИА; 3 – добавка 12,5 об.% ИА; 4 – добавка 25 об.% ИА; 5 – добавка 25 об.% тагамита

образца с обрабатываемым материалом. Применение в составе ММК тагамита, содержащего до 4 % ИА, также позволяет повысить абразивную способность композита до 5 раз по сравнению с исходным твердым сплавом.

Матричные композиты «железо – ИА/тагамит». Перспективным является использование ИА в качестве полировального материала в процессе MAO при формировании микро- и нанорельефа прецизионных поверхностей хрупких неметаллических материалов, что позволяет значительно повысить производительность обработки и качество деталей машиностроения, электронной, оптической и лазерной техники [8].

Метод МС в планетарной мельнице при энергонапряженности 1–2 Вт/г позволяет формировать материал с глобулярной структурой на основе железной матрицы и алмазных частиц, равномерно распределенных в ее объеме. В результате размолла и МС алмазные зерна в матрице измельчаются с исходного размера 80–100 мкм до 0,5–5,0 мкм. Увеличение энергонапряженности процесса до 3 Вт/г приводит к уменьшению размеров алмазов до 0,3–1,0 мкм и самих частиц ММК до размера 1–25 мкм. На рис. 5, а показана структура ММК «Fe – ИА», полученного методом МС.

ММК «железо – тагамит». МС при энергонапряженности 0,3 Вт/г приводит к образованию ММК на основе железа с размерами гранул в диапазоне 60–150 мкм, содержащих включения частиц тагамита в основном в пределах 0,5–5,0 мкм и отдельных более крупных частиц тагамита размером до 10 мкм. Увеличение энергонапряженности до 0,9 Вт/г способствует фор-

мированию гранул размером менее 60 мкм с частицами тагамита субмикронных размеров.

Испытания ММК проводили путем MAO трубок из сплава Zr – 1 % Nb с параметром исходной шероховатости поверхности $Ra = 0,15$ мкм. Сравнительные результаты испытаний ММК «железо – ИА» грануляции 160/100 мкм и ММК «железо – АС» той же грануляции представлены на рис. 5, б.

Из рис. 5, б видно, что размерный съем (на сторону) для композита «Fe – ИА» в 1,5–2,0 раза выше, чем для композита с АС. При этом параметр шероховатости Ra обработанной поверхности через 20 мин при использовании гранул композита «железо – АС» составляет 0,13 мкм, а при MAO с использованием гранул «железо – ИА» снижается до 0,1 мкм.

Испытания абразивных свойств ММК «железо – тагамит» также осуществляли путем MAO трубок из циркониевого сплава Zr – 1 % Nb с исходной шероховатостью 0,23–0,60 мкм. Использовали две фракции ММК – 60/100 и 40/60 мкм. В эксперименте для сравнения применяли также стандартный абразив на основе стального песка СП-17 (17 % Si) ТУ 4196-009-00211033-95 фракции менее 200 мкм.

Испытания каждого абразива проводили на образцах заготовок с малым (M_n), средним (C_n) и высоким (B_n) значениями исходной шероховатости Ra , где n – порядковый номер испытываемого образца. Результаты испытаний приведены в таблице.

Установлено, что наилучший результат по съему (до 1,42 мкм) показал ММК фракции 60/100 мкм при снижении шероховатости Ra с 0,508 до 0,132 мкм. Использование ММК фрак-

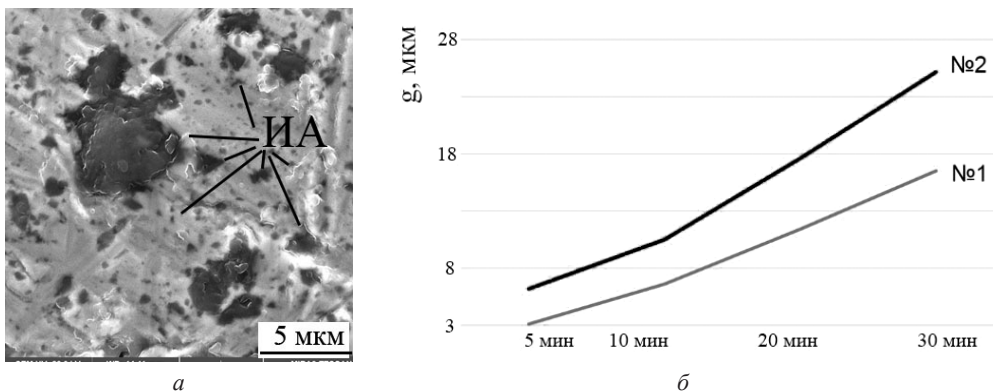


Рис. 5. Микроструктура ММК на основе порошка железа ПЖРВ с включениями ИА (а); зависимость размерного съема g от времени обработки: композит № 1 – «железо – АС»; композит № 2: «железо – ИА» (б)

Результаты испытаний на образцах из циркониевого сплава

№	ММК	Фракция, мкм	Весовой съём, мг	Размерный съём, мкм	Шероховатость Ra , мкм	
					До MAO	После MAO
M_1	№ 1 (Fe – тагамит)	60–100	6	1,01	0,444	0,212
C_1			8	1,42	0,508	0,132
B_1			7	1,25	0,584	0,208
M_2	№ 2 (Fe – тагамит)	40–60	3	0,47	0,235	0,115
C_2			3	0,58	0,251	0,122
B_2			4	0,67	0,284	0,120
M_3	№ 3 (стальной песок СП-17)	≤ 200	3	0,53	0,445	0,153
C_3			6	0,98	0,512	0,133
B_3			5	0,83	0,606	0,166

ции 40/60 мкм привело к уменьшению производительности в 2,0–2,5 раза, но при этом параметр Ra обработанной поверхности достигает значения 0,115 мкм, что незначительно уступает значениям Ra , полученным в результате применения ММК с добавкой ИА (0,1 мкм). Производительность MAO в этом случае составляет 0,2–0,3 мкм/мин, что в 2,5–3,0 раза ниже, чем в случае использования композита «железо – ИА» [9]. В то же время по весовому и размерному съёму ММК «железо – тагамит» фракции 60/100 мкм превосходит абразивную способность стального песка СП-17 (Fe – 17 % Si) в 1,5–1,7 раза при сравнимой шероховатости поверхности.

Заключение. Показано положительное влияние добавок ИА и тагамита в количестве 12,5–25,0 об.% на эксплуатационные характеристики ММК на основе спеченного переработанного твердого сплава ВК-8. Наиболее высокой износостойкостью, до 30 раз превышающей износостойкость

твердого сплава без ИА, обладает композит с 12,5 об.% ИА. Применение в составе ММК тагамита, содержащего до 4 % ИА, позволяет повысить абразивную способность ММК до 5 раз по сравнению с исходным твердым сплавом.

Применение ММК «железо – ИА» позволяет увеличить производительность MAO циркониевого сплава в 1,5–2,0 раза по сравнению с ММК «железо – АС» той же грануляции при достижении параметра Ra обработанной поверхности на уровне 0,1 мкм.

Последовательное использование крупной и мелкой фракций ММК «железо – тагамит» обеспечивает более высокую производительность и качество обработанной поверхности по сравнению с абразивом на основе стального песка СП-17.

Работа выполнена в рамках ГП «Научное развитие технологий и техника», подпрограммы 2 «Освоение в производстве новых и высоких технологий», мероприятия 20⁵.

Литература

1. **Афанасьев, В. П.** Попигагские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий / В. П. Афанасьев, Н. П. Похиленко // Инноватика и экспертиза. – 2013. – Вып. 1 (10). – С. 8–15.
2. **Impact diamonds: Types, properties, and uses** / V. Afanasiev, N. Pokhilenko, A. Eliseev [et al.] // Proc. of 14th Int. Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), Belgorod, 24–27 Sept. 2019. – Belgorod : V. G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2019. – P. 179–182.
3. **Алмазоносные импактиты Попигагской астроблемы** / В. Л. Масайтис, М. С. Машак, А. И. Райхлин [и др.]. – СПб., 1998. – 179 с.
4. **Масайтис, В. Л.** Петрология и геология импактитов / В. Л. Масайтис // Проблемы петрологии / ред. В. С. Соболев [и др.]. – М., 1976. – С. 220–231.
5. **Композиционный материал на основе наноструктурированных импактных алмазов для абразивной обработки** / В. К. Шелег, В. И. Жорник, В. Т. Сенюць [и др.] // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. – 2020. – Вып. 32. – С. 71–79.
6. **Металломатричный композит «железо – тагамит» для магнитно-абразивной обработки циркониевых сплавов** / В. Т. Сенюць, В. И. Жорник, И. В. Валькович [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2024. – Вып. 13. – С. 262–266.
7. **Сенюць, В. Т.** Спекание композиционных материалов инструментального назначения на основе импактных алмазов в условиях высоких давлений и температур / В. Т. Сенюць // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 47–57. – DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-1-47-57.

8. **Синтез** наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки / П. А. Витязь, В. Т. Сенють, В. И. Жорник [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2024. – Вып. 8. – С. 352–356.

9. **Получение** композитов на основе алмаз-лонсдейлитового абразива для финишной обработки износостойких материалов / П. А. Витязь, В. Т. Сенють, В. И. Жорник [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–11 сент. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 338–343.

METAL MATRIX TOOL COMPOSITES USING IMPACTITES FROM THE POPIGAY DEPOSIT

V. T. Senyut¹, P. A. Vityaz¹, I. V. Valkovich¹, V. P. Afanasyev², I. E. Grigoriev³, N. S. Khomich⁴

¹The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 12, 220072, Minsk, Belarus, e-mail: vsenyut@tut.by

²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Academician Koptyug Ave., 3, 630090, Novosibirsk, Russia

³Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13A, 220006, Minsk, Belarus

⁴UP “Polimag” SE “NTP BNTU Polytechnic”, Surganova str., 37/1, 220013, Minsk, Belarus

The article presents the results of studies of metal matrix composites (MMC) containing impact diamond (ID) for tool purposes. A composite based on VK-8 hard alloy containing 6.25–25.0 vol.% ID was obtained by thermobaric treatment. The composite has a wear resistance that is up to 30 times higher than that of sintered hard alloy that does not contain diamonds. MMCs intended for magnetic abrasive polishing (MAP) of zirconium alloys were obtained by mechanical alloying of iron with impact diamond (tagamite diamond-containing rock). The “iron – impact diamond” MMC has abrasive resistance and service life that are 1.5–2.0 times higher than the “iron – synthetic diamond SD” MMC. The use of tagamite in the MMC composition has improved the performance characteristics (resistance, abrasive capacity) of the composite for MAP products made of zirconium alloy compared to the ferroabrasive powder based on steel sand SP-17 (Fe – 17 % Si).