

УДК 621.923

**СПЕКАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ БОРА И КРЕМНИЯ***канд. техн. наук, доц. С.В. ЯКУБОВСКАЯ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**канд. техн. наук, доц. В.Е. БАБИЧ**(Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск)*

Представлены результаты исследования морфологии поверхности ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (карбид бора); феррит меди-стекло-карбид кремния (карбид бора), которые позволили установить, что их структура определяется концентрацией связующего и температурой спекания. Выявлено, что в зависимости от концентрации связующего спекание шихты (брикетов) приводит к формированию композиционных материалов с различной структурой.

Ключевые слова: *магнитно-абразивная обработка, абразивный материал, спекание шихты, ферромагнитные композиционные материалы.*

Введение. Эксплуатационные характеристики абразивных материалов адаптированы для конкретных процессов обработки. В отличие от абразивных материалов, используемых в традиционных процессах абразивной обработки (обработка свободным абразивом, обработка связанным абразивом, обработка закрепленным абразивом), абразивные материалы, применяемые в процессах магнитно-абразивной обработки, представляют собой ферромагнитные частицы, содержащие включения абразива, объединенные в сгусток-абразивный инструмент магнитным полем [1]. Ферроабразивные композиционные материалы представляют собой матрицу, в которой расположены ферромагнитные частицы и абразив. Такие материалы получают на основе сплавов железа, либо их спеков на основе железа и частиц абразива. Наиболее широко в качестве абразива в таких материалах используются карбид кремния и оксид алюминия [2; 3]. Использование в качестве абразива карбида бора и карбида кремния и более легкоплавких связующих позволит повысить абразивные характеристики композиционных материалов. Однако использование немагнитных связующих требует увеличения содержания в композиционных материалах ферромагнитных наполнителей и снижения содержания связующих. В этих условиях физико-механические и эксплуатационные характеристики ферромагнитных композиционных материалов будут зависеть от режимов их получения (спекания).

Цель представленной работы – повысить эксплуатационные характеристики композиционных магнитно-абразивных материалов за счет применения в качестве абразива карбидов бора и кремния с обоснованием режимов их спекания [2–4].

Основная часть. Объектом исследования являлись ферромагнитные композиционные материалы железо (феррит меди)-стекло-карбид кремния (карбид бора).

В качестве ферромагнитного наполнителя использовали феррит меди и железо; в качестве абразивов – порошки карбида бора и карбида кремния; в качестве связующего при получении ферромагнитных связок применяли легкоплавкие стекла на основе дигидрофосфатов натрия, калия, цинка. Флюсующей добавкой служил фторид натрия.

Связующее получали следующим образом: дигидрофосфаты калия, натрия, цинка и фторид натрия перемешивали в фарфоровой ступке. Затем шихту нагревали при 500 К в течение 0,5 часа. Полученную фритту стекла измельчали и отсеивали порошок фракции 50 мкм. Температура начала растекания стекла составляла 620 К. Далее связующее смешивали с ферритом меди или порошком железа. Затем в полученную шихту связующее-ферромагнитный наполнитель вводили карбид кремния. Концентрация связующего в композиционных материалах составляла 8, 15, 25 об. %. Шихту отжигали при 775, 825, 875 К; длительность спекания составляла 30 минут. Из шихты прессовали брикеты при давлении 10 МПа, которые далее отжигали при 775, 875 К.

Исследование морфологии и микроструктуры поверхности ферромагнитных композиционных материалов проводили на растровом электронном микроскопе VEGA/TESCAN.

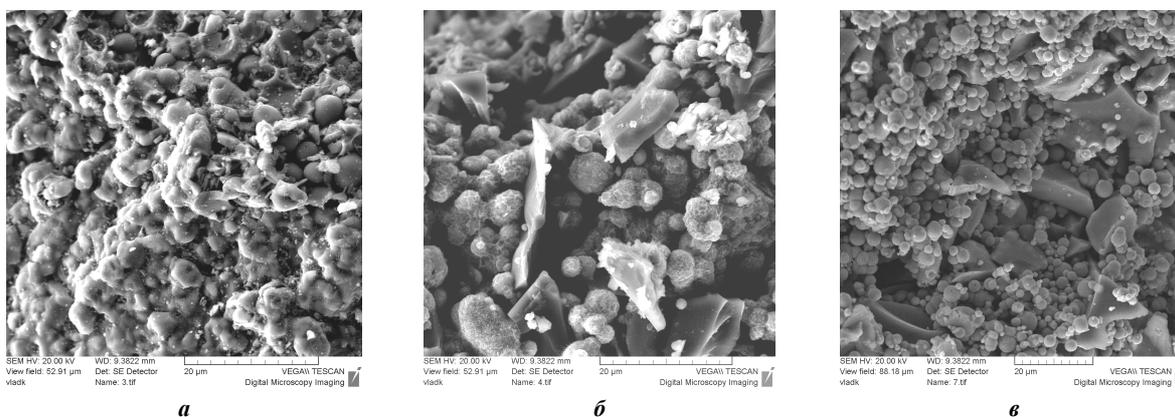
Проведенное исследование морфологии поверхности ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния показало следующее:

- формирование пленок связующего на поверхности частиц карбида кремния и железа происходит при концентрации связующего в композиционном материале 25 об. % (рисунок 1);

- при концентрации стекла в композиционном материале 25 об. % стекло образует пленки на частицах карбида кремния и железа. Структура композиционного материала представляет собой стеклянную матрицу, в которой расположены частицы железа и карбида кремния. Концентрация стекла в композиционном материале достаточна, чтобы сформировался объемный каркас, в котором расположены частицы карбида кремния и железа (рисунок 1, а);

- снижение концентрации связующего (стекла) в композиционном материале изменяет его структуру;
 - снижение концентрации стекала в композиционном материале до 15 об. % приводит к образованию пор, однако пленка стекла присутствует на частицах карбида кремния и железа (рисунок 1, б). Структура такого композиционного материала представляет собой каркас из частиц железа и карбида кремния, в котором присутствуют поры. Несмотря на снижение содержания стекла в композиционном материале стекло формирует пленки на поверхности частиц железа и карбида кремния. На отдельных участках композиционного материала, где концентрация стекла больше, образуются агломераты из частиц карбида кремния, железа и стекла. Структура таких агломератов подобна структуре композиционного материала с содержанием стекла 25 об. % (рисунок 1, а).

Последующее снижение содержания стекла в композиционном материале до 8 об. % приводит к формированию материала, структура которого представляет собой сгусток частиц карбида кремния и железа, слабосвязанных между собой (рисунок 1, в). Концентрация стекла в композиционном материале недостаточна для формирования сплошных пленок (оболочек) на поверхности частиц железа и кремния. Объединение частиц карбида кремния и железа в сгусток обеспечивается островковыми пленками на поверхности частиц (рисунок 1, в).



**Концентрация железа в композиционном материале, об. %: а – 50; б – 60; в – 70;
 концентрация стекла в композиционном материале, об. %: а – 25; б – 15; в – 5;
 концентрация карбида кремния в композиционном материале, об. %: а, б, в – 25**

**Рисунок 1. – Морфология поверхности композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния
 Температура спекания 875 К**

Согласно полученным экспериментальным данным, снижение температуры спекания от 825 до 775 К не приводит к изменению микроструктуры ферромагнитных композиционных материалов, содержащих 25 об. % стекла. Однако в композиционном материале, спеченном при 775 К, формируется структура, подобная структуре композиционного материала с содержанием 15 об. % стекла, спеченного при 875 К (рисунок 2).

Спекание шихты при 775 и 825 К с меньшим содержанием стекла (15 и 8 об. %) приводит к формированию в композиционном материале структур, представляющих собой сгусток из частиц железа и карбида кремния, объединенных пленками стекла на поверхности частиц (рисунок 3).

Снижение температуры спекания ферромагнитных композиционных материалов, содержащих 8 и 15 об. % связующего, приводит к формированию структур, в которых частицы карбида кремния и железа связаны между собой прослойками пленок стекла на соседних частицах (см. рисунок 3). Межчастичные промежутки не заполнены стеклом. Несмотря на небольшое содержание стекла (8 и 15 об. %) в композиционном материале на частицах железа и карбида кремния присутствуют пленки стекла (рисунок 3 а, б). В структуре композиционных материалов также присутствуют агломераты, представляющие собой несколько частиц железа, карбида бора в стеклянной матрице (рисунок 3 б). Формирование таких структур в ферромагнитных композиционных материалах с содержанием стекла 8 и 15 об. %, спеченных при 775 и 875 К, показывает, что после плавления частиц стекла расплав гидроксидного стекла смачивает поверхность частиц железа и карбида кремния. При последующем повышении температуры гидроксид-

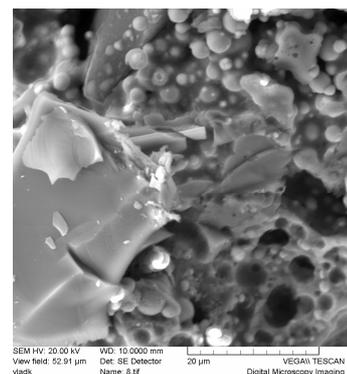
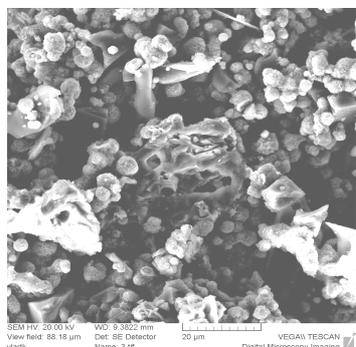
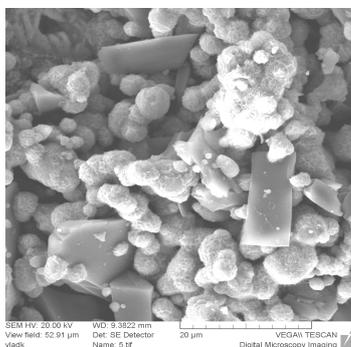
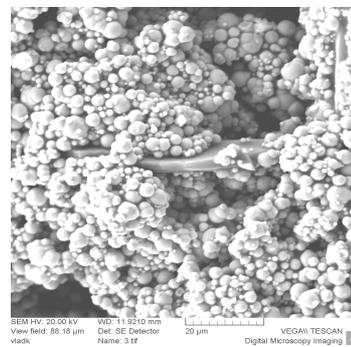
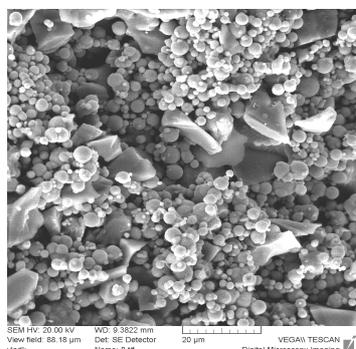


Рисунок 2. – Микроструктура композиционного материала железо (50 об. %)–стекло (25 об. %)–карбид кремния (25 об. %) Температура спекания 775 К

ное стекло теряет воду и превращается в оксидное стекло. Морфология поверхности частиц железа показывает, что в процессе нагрева спека происходит взаимодействие стекла, находящегося на поверхности частиц железа, с железом. Следствием этого является изменение состава стекла и повышение температуры перехода в вязкое состояние, что приводит к прекращению процесса растекания оксидного расплава на поверхности частиц и образованию участков с повышенной концентрацией стекла (агломератов).

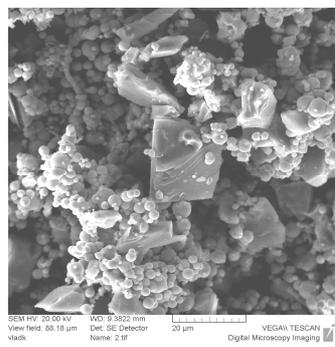
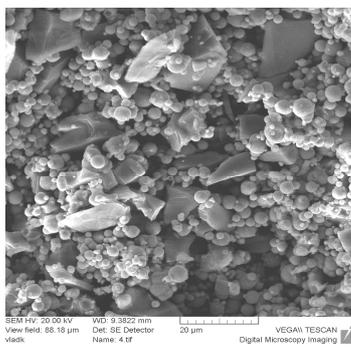
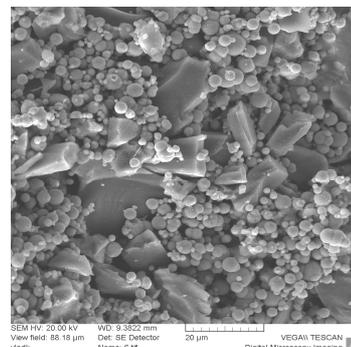
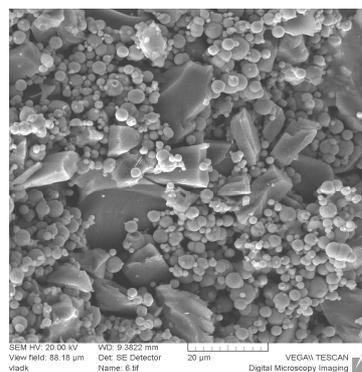
**a****б****в****z**

**Концентрация железа в композиционном материале, об. %: *a, в* – 67; *б, z* – 60;
концентрация стекла в композиционном материале, об. %: *a, в* – 8; *б, z* – 15;
концентрация карбида кремния в композиционном материале, об. %:
a, в – 15; *б, z* – 25**

Температура спекания, К: *a, б* – 775; *в, z* – 825

**Рисунок 3. – Микроструктура композиционных материалов
железо-стекло-карбид кремния**

Спекание брикетов из шихты не приводит к существенному изменению структуры ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (рисунок 4).

**a****б****в****z**

**Концентрация стекла в композиционном материале, об. %:
a, б – 8; *в, z* – 15**

Температура спекания, К: *a, в* – 775; *б, z* – 825

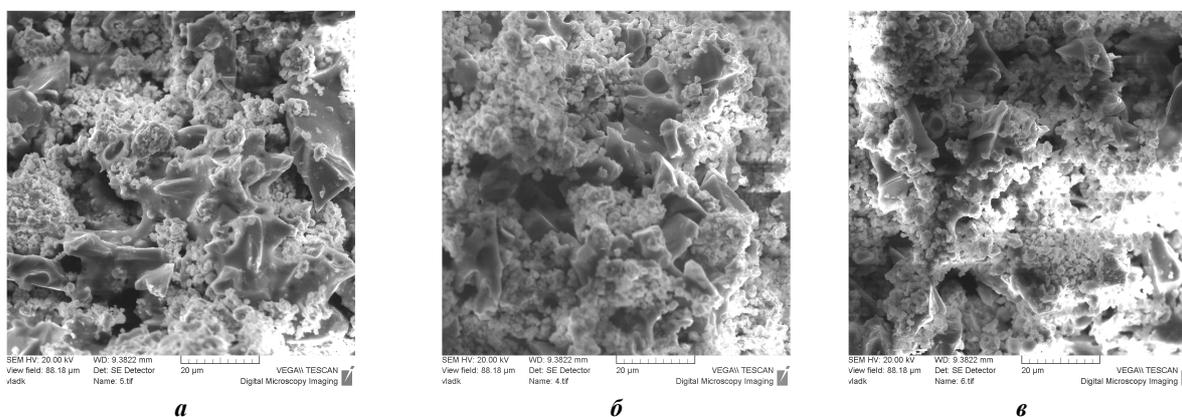
Давление холодного прессования 10 МПа

**Рисунок 4. – Микроструктура композиционных материалов
железо-стекло-карбид кремния**

Структура композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния, полученных спеканием брикетов, представляет собой объемный каркас из частиц карбида кремния и железа. Пленки (островковые) присутствуют как на частицах карбида кремния, так и железа (см. рисунок 4). Однако сплошная стеклянная матрица не образуется. Участки множественных стыков между частицами не заполнены стеклом (см. рисунок 4).

Согласно полученным экспериментальным данным, спекание шихты феррит меди-стекло-карбид кремния; феррит меди-стекло-карбид бора, с содержанием 8 и 15 об. % стекла не приводит к формированию композиционных материалов. После спекания шихты при 775 К, 825 и 875 К образуются спеки из слабосвязанных между собой частиц. Увеличение концентрации стекла в шихте до 25 об. % приводит к образованию композиционных материалов (рисунок 5).

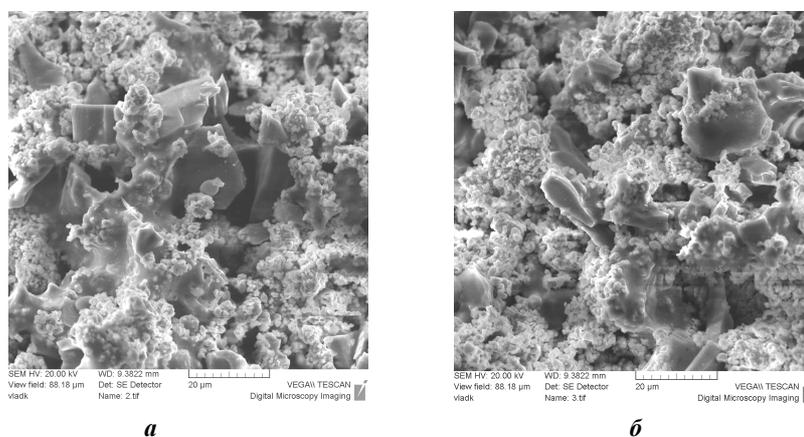
Структура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид кремния при содержании стекла 25 об. % зависит от температуры спекания). При температуре спекания 875 К в структуре композиционного материала присутствуют частицы стекла (рисунок 5, *а*). Пленки стекла присутствуют как на частицах карбида кремния, так и на частицах феррита меди. Снижение температуры спекания приводит к формированию композиционных материалов с более однородным распределением стекла (рисунок 5, *б*, *в*). Однако в структуре композиционных материалов присутствуют участки с большей концентрацией стекла, чем на соседних участках (рисунок 5, *б*).



Температура спекания, К: *а* – 875; *б* – 825; *в* – 775.

Рисунок 5. – Микроструктура композиционных материалов: феррит меди (50 об. %)–стекло (25 об. %)–карбид кремния (25 об. %)

Спекание брикетов из шихты феррит меди-стекло-карбид кремния не приводит к существенному изменению структуры композиционных материалов (рисунок 6). В структуре композиционных материалов, полученных спеканием брикетов, как и в структуре композиционных материалов, полученных спеканием шихты, присутствуют частицы стекла (рисунок 6, *а*).



Температура спекания, К: *а* – 875; *б* – 775

Давление горячего прессования 10 МПа

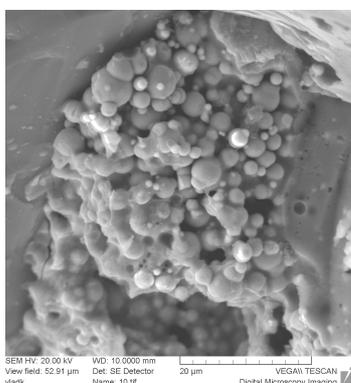
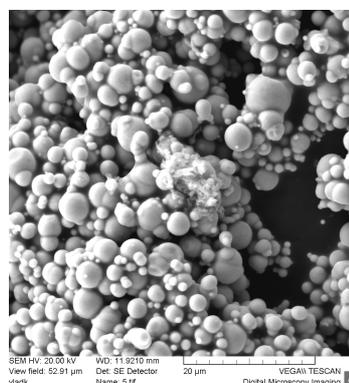
Рисунок 6. – Микроструктура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид кремния

Микроструктура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид кремния, полученных спеканием шихты и брикетов, свидетельствует о том, что стекло смачивает частицы феррита меди (см. рисунки 5, 6). Смачивание частиц феррита меди расплавом гидроксидного, а затем оксидного стекла приводит к образованию материала, структура которого представляет собой матрицу из стекла с расположенными в ней частицами феррита меди.

Концентрация стекла 25 об. % в композиционном материале достаточна для образования объемной пленки стекла, окружающей как частицы феррита меди, так и частицы карбида кремния (см. рисунки 5, 6). В результате этого образуется композиционный материал, структура которого представляет матрицу из частиц феррита меди (меньших по размеру, чем частицы карбида кремния) и прослоек стекла между ними, в которой расположены частицы карбида кремния (см. рисунки 5, 6).

Меньшие, чем размеры частиц железа, размеры частиц феррита меди приводят к тому, что снижение концентрации стекла до 15 и 8 об. % не вызывает полное смачивание поверхности частиц феррита меди и объединение их в матричный материал. Присутствие пор в агломератах феррита меди свидетельствует о сильной зависимости структуры композиционного материала феррит меди-стекло-карбид кремния от концентрации стекла, обусловленной взаимодействием стекла с ферритом меди (см. рисунки 5, б; 6, б).

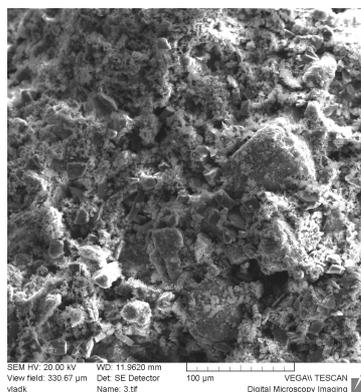
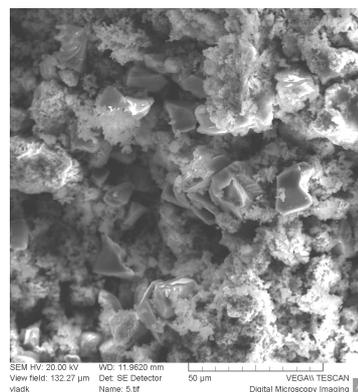
При спекании композиционных материалов железо-стекло-карбид бора и феррит меди-стекло-карбид бора отмечаются аналогичные зависимости изменения микроструктуры композиционных материалов, что и при спекании композиционных материалов с карбидом кремния (рисунки 7, 8).

*a**б*

**Концентрация железа в композиционном материале, об. %: $a - 50$; $б - 67$;
концентрация стекла в композиционном материале, об. %: $a - 25$; $б - 8$;
концентрация карбида бора в композиционном материале, об. %: a ; $б - 25$**

Температура спекания 875 К

Рисунок 7. – Микроструктура композиционных материалов железо-стекло-карбид бора

*a**б*

**Концентрация феррита меди в композиционном материале, об. %: $a - 50$; $б - 67$;
концентрация стекла в композиционном материале, об. %: $a - 25$; $б - 8$;
концентрация карбида бора в композиционном материале, об. %: a , $б - 25$**

Температура спекания 875 К

Рисунок 8. – Микроструктура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид бора

Снижение содержания связующего от 25 до 8 об. % в композиционном материале феррит меди-стекло-карбид бора, несмотря на образование пленок стекла на частицах карбида бора и феррита меди, увеличивает содержание пор в спеке (рисунок 8, б). Структура композиционных материалов феррит меди-стекло-карбид бора с 8 об. % стекла представляет собой агломераты из частиц феррита меди, карбида бора и прослоек стекла. Эти агломераты соединены друг с другом прослойками стекла в различных агломератах. Поры в композиционном материале расположены как в местах стыков агломератов, так и в самих агломератах (см. рисунки 7, 8).

Характер изменения микроструктуры ферромагнитных композиционных материалов с карбидом кремния и карбидом бора при изменении температуры спекания, концентрации связующего показывает, что формирование композиционного материала зависит от условий растекания расплавов гидроксидного, а затем оксидного стекол по поровым каналам каркаса из частиц абразива и ферромагнитного наполнителя.

Заключение. Проведенное исследование позволили получить результаты по влиянию процессов спекания ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (карбид бора), феррит меди-стекло-карбид кремния (карбид бора), концентрации связующего и температуры спекания на морфологию и микроструктуру композиционных материалов.

Исследование морфологии поверхности ферромагнитных композиционных материалов железо-стекло-карбид кремния (карбид бора); феррит меди-стекло-карбид кремния (карбид бора) показало, что структура этих материалов определяется концентрацией связующего и температурой спекания. В зависимости от концентрации связующего спекание шихты (брикетов) приводит к формированию композиционных материалов с различной структурой.

При концентрации связующего 25 об. % во всем температурном интервале спекания формируются композиционные материалы, структура которых представляет матрицу из ферромагнитного наполнителя (железа, феррита меди), в которой расположены частицы абразива.

Снижение содержания стекла в шихте, содержащей в качестве ферромагнитного наполнителя железо, до 15 об. % приводит к формированию композиционных материалов, структура которых представляет собой совокупность агломератов из частиц абразива, ферромагнитного наполнителя и стекла, объединенных в единое целое прослойками из частиц ферромагнитного наполнителя, абразива, в которых содержание стекла меньше, чем в агломератах. В области меньших концентраций стекла (8 об. %) формируются композиционные материалы, структура которых представляет собой сгусток из частиц абразива, ферромагнитного наполнителя и пленок стекла на поверхности частиц.

Формирование композиционных материалов, содержащих в качестве ферромагнитного наполнителя феррит меди, наблюдается только при концентрации стекла в шихте 25 об. %. Причиной этого являются меньшие размеры частиц феррита меди и взаимодействие стекла с ферритом меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 326 с.
2. Гнесин, Г.Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г.Г. Гнесин, М.Д. Крымский, Л.Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев : ИПМ АНУССР, 1980. – С. 17–25.
3. Оликер, В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Оликер. – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.
4. Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – 284 с.

Поступила 18.01.2019

STUDY OF THE PROCESSES OF SINTERING FERROMAGNETIC COMPOSITION MATERIALS BASED ON BORON CARBIDE, SILICON CARBIDE

S. YAKUBOVSKAYA, V. BABICH

The morphology of the surface of ferromagnetic iron-glass-silicon carbide (boron carbide) composite materials has been studied; copper ferrite-glass-silicon carbide (boron carbide) which made it possible to establish that their structure is determined by the concentration of the binder and the sintering temperature. Depending on the concentration of the binder, sintering the mixture (briquettes) leads to the formation of composite materials with different structures.

Keywords: magnetic abrasive processing, abrasive material, sintering of the charge, ferromagnetic composite materials.