

50 мм и более ( $x \geq 50$  %). Наличие прокладки под датчиком прибора ИМА-4М приводит к погрешности измерения градиента  $\nabla H_r$ , приблизительно равной 20 %. Исходя из этого возможно использование импульсного магнитного метода для обнаружения трещин в упрочненных слоях, например, если выполнять их сканирование.

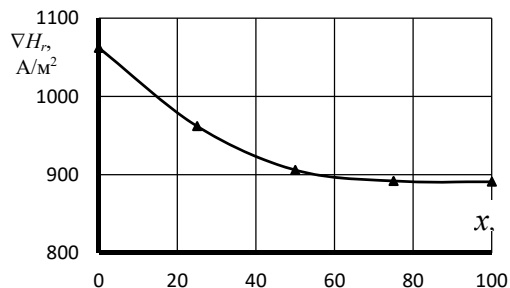


Рисунок 3 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_r$  от относительного расположения  $x$  прокладки (толщиной 35 мкм, шириной и длиной 20 мм) от центра образца к его краю

Очевидно, что проведенный эксперимент не в полной мере учитывает влияние реальной трещины на величину градиента  $\nabla H_r$ , поскольку трещина возникает в структуре ферромагнетика, а прокладка фактически является дополнительной неферромагнитной структурой, которая изменяет размеры набора пластин и т.д. Однако, в качестве некоторой оценки влияния трещин на результаты контроля толщины упрочненного слоя импульсным магнитным методом такой подход вполне обоснован.

Необходимо также отметить, что влияние реальных трещин на контроль толщины упрочненного слоя импульсным магнитным методом будет существенно ниже, поскольку трещины, которые обычно встречаются на практике, имеют значительно меньшие размеры. Для большей объективности в определении влияния трещин на результаты неразрушающего контроля упрочненного слоя в каждом конкретном случае необходимы дополнительные многосторонние и мно-

гофакторные исследования (с учетом размеров, формы, свойств и т.д. образцов).

По результатам исследований была установлена возможность определения толщины упрочненного слоя по величине градиента напряженности поля остаточной намагниченности [6], но для увеличения надежности и достоверности контроля необходимо проведение предварительной проверки изделий на наличие внутренних трещин и особенно в зоне намагничивания и измерения остаточной намагниченности импульсным магнитным методом. Возможно также применение данного подхода в многопараметровых задачах для увеличения надежности выпускаемой продукции.

Таким образом, проведена оценка влияния неоднородностей структуры на возможность неразрушающего контроля толщины упрочненного слоя при использовании импульсного магнитного метода контроля.

#### Литература

1. Горкунов, Э.С. Электромагнитные методы и средства контроля качества поверхностного упрочнения стальных изделий / Э.С. Горкунов, Б.М. Лапидус. – Препринт. – Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1986. – 48 с.
2. Михеев, М.Н. магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – Москва: Наука. – 1993. – 252 с.
3. Матюк, В.Ф. Определение толщины упрочненного слоя по изменениям формы петли гистерезиса / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов, В.Б. Кратиров // Дефектоскопия. – 1997. – № 9. – С. 32–41.
4. Мельгуй, М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М.А. Мельгуй [и др.] // Научно технические достижения. – 1990. – № 4. – С. 41–44.
5. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М / В.Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 47–53.
6. Счастный, А.С. Оценка возможности контроля толщины упрочненных слоев импульсным магнитным методом / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Приборостроение-2019: материалы 12-ой Международной научно-технич. конф. – Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Минск, БНТУ, 2019. – С. 316–318.

УДК 666.3/7 (075.8)

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

Дятлова Е.М.<sup>1</sup>, Сергиевич О.А.<sup>1</sup>, Колонтаева Т.В.<sup>2</sup>, Бука А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Введение.** Износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Износостойкость

зависит от состава и структуры обрабатываемого материала, исходной твёрдости, шероховатости и технологии обработки детали, состояния ответной детали. Также существуют методы повышения износостойкости деталей благодаря нанесению

специального износостойкого покрытия на поверхность детали. При этом износостойкость детали без покрытия может быть намного ниже, чем у детали с износостойким покрытием. Важными свойствами для износостойких материалов являются твердость и микротвердость.

Как известно [1], диоксид титана обладает повышенным значением диэлектрической проницаемости и является основным материалом для изготовления «конденсаторной керамики». Современные материалы на основе титановых соединений с металлом по прочности находятся на уровне металлокерамическими системами на основе благородных металлов или сплавов без них. Титановая керамика – это керамика на основе соединений титана. Наиболее широко используется керамика на основе рутила ( $\text{TiO}_2$ ), перовскита ( $\text{CaTiO}_3$ ), титаната стронция ( $\text{SrTiO}_3$ ) и титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) [2]. Диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) используется как модифицирующая добавка, а также в качестве основы радио- и электротехнической керамики, способы получения которой в последние годы претерпели существенные изменения, связанные в первую очередь с расширением области ее применения.

Целью данной работы является разработка составов и технологических параметров синтеза масс износостойкой керамики на основе  $\text{TiO}_2$  для изготовления нитепроводителей в текстильной промышленности.

**Методология.** Керамическая масса готовилась сухим способом путем совместного измельчения определённого количества исходных сырьевых компонентов в планетарной мельнице марки РМ 100 фирмы Netzsch (Германия) в течение 20 мин при скорости вращения барабана 250 об/мин. с последующим магнитным обогащением до остатка на контрольном сите № 0063 в количестве не более 1–2 %. Пресс-порошок влажностью

8–10 % с использованием в качестве связки воды или полуводной дисперсии клея поливинилацетата (ПВА) протирался через сито № 05. Прессование лабораторных образцов (цилиндров  $\varnothing$  20 мм и высотой 20 мм, дисков  $\varnothing$  16 мм и высотой 5–10 мм, плиток (50×50×5) мм и балочек (50×8×8) мм) осуществлялось на гидравлическом прессе ПСУ–50 при давлении 20–30 МПа. Образцы сушились при температуре  $100 \pm 5$  °С в сушильной шкафу типа СНОЛ. Обжиг образцов проводился в лабораторной электрической печи типа SNOЛ 6,7/1 300 в температурном интервале 1 350–1 400 °С со скоростью подъема 200–250 °С/ч и выдержкой при максимальной температуре 1 ч, охлаждение – инерционное.

**Экспериментальная часть.** В качестве компонентов, улучшающих формовочные свойства композиций, выбраны глина огнеупорная Веселовского месторождения «Керамик-Веско», бентонит огланлыкский, тальк онотский. Химические составы керамических масс представлены в таблице 1.

В результате синтеза были получены образцы-диски диаметром 20 мм. Образцы составов 1, 2, 3 при температурах обжига 1 400, 1 450 °С имели светло-желтоватый цвет, а образцы составов 4, 5, 6 – светло-коричневый. Все образцы имели спекшийся черепок. Общая усадка образцов составила в среднем 5–11 %. Изменение водопоглощения опытных образцов от состава и температуры обжига приведены на рисунке 1.

Можно отметить активизацию спекания образцов № 1, 2, 3 при увеличении температуры обжига, что связано с интенсификацией процессов переноса вещества и увеличения количества расплава, способного к вязкому течению, в результате чего уменьшается водопоглощение и возрастает плотность.

Таблица 1 – Химический состав опытных керамических масс

№ состава	Оксиды и их содержание, %										
	$\text{TiO}_2$	$\text{ZrO}_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{BaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_2$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2$	ППП
1	87,04	5,0	1,09	1,55	1,31	0,05	0,06	–	0,07	3,00	0,83
2	89,54	2,5	1,09	1,55	1,31	0,05	0,06	–	0,07	3,00	0,83
3	92,04	–	1,09	1,55	1,31	0,05	0,06	–	0,07	3,00	0,83
4	93,29	–	1,09	–	1,32	0,07	0,69	0,01	0,07	3,00	0,46
5	92,53	–	1,09	–	1,33	0,10	1,31	0,01	0,07	3,00	0,56
6	90,77	–	1,09	–	1,65	0,12	1,94	0,02	0,07	3,00	0,64

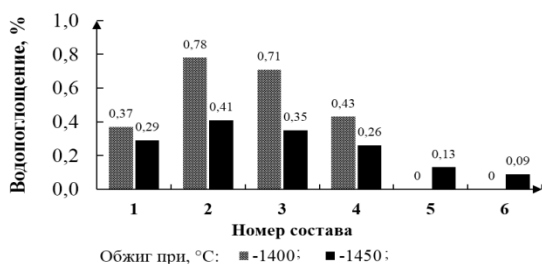


Рисунок 1 – Показатели водопоглощения опытных образцов

При обжиге 1 400 °С изделия имели твердость по шкале Мооса 7,0, при 1 450 °С – 8,0. Микротвердость поверхности необработанных образцов выше, чем после шлифовки, что можно объяснить более мелкозернистой структурой поверхностного слоя, формирующего при спекании на границе раздела фаз, и составляет 4 000–7 900 МПа при 1 400 °С и 7 000–8 100 МПа при 1 450 °С. Зависимость механической прочности опытных образцов от состава и температуры обжига приведена на рисунке 2.

Механическая прочность при сжатии материалов, полученных на основе масс исследуемой системы и обожженных при температуре 1 400 °С, находится в пределах 616,5–627,6 МПа, при температуре 1 450 °С – 619,3–631,5 МПа. Повышение механической прочности материалов при повышении температуры обусловлено интенсификацией процессов образования кристаллических фаз (в основном рутила), обеспечивающих высокие физико-химические свойства, а также увеличением количества образующегося при термообработке расплава, который способствовал заполнению пор, цементированию керамической матрицы образцов и формированию более плотной структуры.

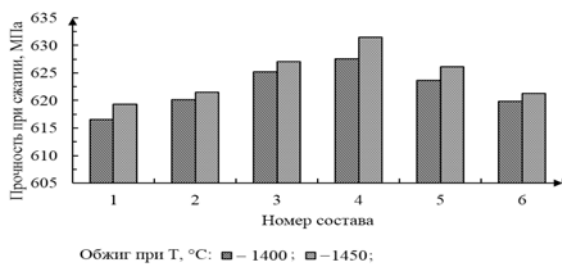


Рисунок 2 – Зависимость прочности при сжатии образцов от состава

Рост показателей ТКЛР, значения которых составляют для всех исследуемых составов (6, 9–7, 8)·10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> при 300 °С, с увеличением температуры обжига объясняется снижением пористости материала и увеличением содержания кристаллических фаз. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разработанные материалы достаточно устойчивы к агрессивным средам (кислотостойкость составляет 92–94 %, щелочестойкость – 94–97 %). При сопоставлении экспериментально определенных значений межплоскостных расстояний d и относительной интенсивности линий с эталонными дифрактограммами кристаллических фаз было выявлено, что качественный фазовый состав образцов 1, 3, 5, обожженных при температуре 1 400 °С, представлен в основном рутилом, незначительным количеством анатаза и перовскита.

Анализируя полученные данные, в качестве оптимального выбран состав № 5, содержащий диоксид титана, фторид кальция, глину огнеупорную Веселовского месторождения, бентонит огланлыкский, тальк онотский. Образец обладает следующими характеристиками: температура обжига – 1 400 °С, кажущаяся плотность –

3 630 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – 0,0 %, открытая пористость – 0,0 %, ТКЛР – 6,63·10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>, прочность при сжатии – 619,8 МПа, твердость по Моосу – 7, микротвердость – 8 409,33 МПа.

Результаты оптической микроскопии поверхности образца № 5 и внутреннего скола представлены на рисунке 3.

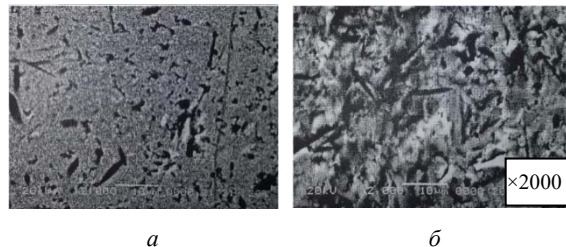


Рисунок 3 – Оптическое-микроскопическое изображение поверхности (а) и скола (б) синтезированных образцов состава 5

Исследование структуры скола и поверхности опытных образцов показало, что на поверхности размер кристаллов значительно меньше, поры практически отсутствуют. Скол характеризуется более гетерогенной структурой, что проявляется в показателях микротвердости.

**Заключение.** Таким образом, разработанные составы титансодержащих керамических материалов могут быть использованы в электронной, химической и машиностроительной отрасли, а также для получения износостойких деталей для применения на предприятиях легкой промышленности.

В качестве оптимального выбран состав, содержащий диоксид титана, фторид кальция, глину огнеупорную Веселовского месторождения, бентонит огланлыкский, тальк онотский. Образец обладает следующими характеристиками: температура обжига – 1 400 °С, кажущаяся плотность – 3 630 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – 0,0 %, открытая пористость – 0,0 %, ТКЛР – 6,63·10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>, прочность при сжатии – 619,8 МПа, твердость по шкале Мооса – 7, микротвердость – 8 409,33 МПа.

#### Литература

1. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2007. – 368 с.
2. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.