

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 54.31:54.057:544.023:544.23:544.72

СИНТЕЗ ПОЛИТИТАНАТОВ КАЛИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ
В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ $\text{TiO}_2\text{--KOH--K}_2\text{PO}_4$, И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ ПРОДУКТОВ

© 2020 г. Н. О. Морозова^а, Т. В. Никитюк^а, А. Р. Цыганов^а, Д. С. Юрий^а, А. В. Гороховский^а, *

^аСаратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
ул. Политехническая, 77, Саратов, 410054 Россия

*e-mail: algo54@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.2019 г.

После доработки 10.12.2019 г.

Принята к публикации 30.01.2020 г.

Показана возможность синтеза квазиаморфных частиц полититаната-полифосфата калия, имеющих слоистую структуру и высокие антифрикционные свойства, путем обработки порошка диоксида титана в расплавах системы $\text{KOH--K}_2\text{PO}_4$. Выявлено, что при определенном соотношении компонентов в использованной сырьевой смеси на ее основе может быть получен продукт с минимальным присутствием кристаллических фаз. Показано, что частицы полученного рентгеноаморфного продукта имеют слоистую структуру, аналогичную структуре полититаната калия, синтезированного в расплавах системы $\text{TiO}_2\text{--KOH--KNO}_3$, но характеризуются высоким содержанием фосфора, присутствие которого положительно влияет на трибологические характеристики материала. Обнаружено, что при $[\text{K}_2\text{PO}_4] > [\text{TiO}_2]$ в составе реакционной смеси происходит формирование вторичной кристаллической фазы $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$, присутствие которой улучшает противозадирные, но снижает антифрикционные свойства смазочных композиций на основе полученных продуктов.

Ключевые слова: модифицированные полититанаты калия, синтез, структура, трибологические свойства

DOI: 10.31857/S0044457X20060124

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все большее развитие получают методы так называемой “мягкой химии”, основанные на использовании материалов-прекурсоров, синтезируемых в условиях относительно низких температур, в том числе в водных растворах. Химический состав таких материалов может регулироваться в широких пределах за счет варьирования состава реагентов и/или методов модифицирования [1–3]. При этом используемые методики синтеза весьма многообразны. Так, комбинация гидротермального и золь-гель методов позволяет получить сложные оксиды состава $\text{La}_{2/3}\text{TiO}_{3-\delta}$ [4], низкотемпературный (300–600°C) твердофазный синтез обеспечивает образование сложного оксида $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ [5]. Сложные фазы, в том числе $\text{NdTi}_2\text{O}_{4.75}\text{F}_{0.5}(\text{SO}_4)_{0.5} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NdTiF}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($\text{NdTiOF}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), могут быть получены с использованием растворной технологии [6]. Гидротермальным синтезом были получены твердые растворы состава $\text{LnSr}_2\text{CuTiO}_{6.5}$, имеющие структуру перовскита [7], а в работе [8] при взаимодействии эксфолированных слоистых структур были приготовлены наногибридные

мезопористые материалы на основе чередующихся слоев гидроксида железа и титаната. Низкотемпературным пиролизом экстрагированных многофункциональных лигандов синтезировали нанокompозиты на основе оксидов марганца и тербия, а также марганца, тербия и серебра [9].

Среди материалов-прекурсоров важное место занимают полититанаты калия (ПТК). Квазиаморфные частицы ПТК имеют слоистую структуру, подобную структуре кристаллического лепидокрокита [10], однако сильно искаженную в результате варьирования расстояний между слоями, сформированными титанкислородными октаэдрами (вставка на рис. 1а). Благодаря ионному обмену $\text{K}^+ \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+$, протекающему при отмывке конечного продукта от остаточных водорастворимых солей, может варьироваться и химический состав ПТК, представленный формулой $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{TiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ($n = 3.5\text{--}6.6$; $m = 0.2\text{--}1.2$).

Известно несколько способов получения квазиаморфных титанатов калия, в частности низкотемпературный синтез в расплавах системы $\text{TiO}_2\text{--KOH--KNO}_3$ [10] и гидротермальный синтез в системе $\text{TiO}_2\text{--KOH--H}_2\text{O}$ [11]. Синтезируемые

полититанаты калия различной стехиометрии легко модифицируются в водных растворах солей переходных металлов (М) в ходе интеркаляции ионов M^{n+} в межслойное пространство частиц ПТК либо путем декорирования их поверхности наночастицами оксидно-гидроксидных комплексов переходных металлов [12]. Такие продукты модифицирования имеют высокие каталитические и фотокаталитические свойства, приобретают свойства полупроводников с регулируемой величиной запрещенной зоны [13], проявляют высокую диэлектрическую проницаемость и ионную проводимость [14, 15].

Частицы базового полититаната калия, а также ПТК, модифицированных в водных растворах солей переходных металлов (МПТК), имеют высокие трибологические свойства, аналогичные свойствам дисульфида молибдена. Слои частиц МПТК легко перемещаются друг относительно друга, что обеспечивает низкие значения коэффициента трения. Внедрение частиц переходных металлов в состав трущихся металлических поверхностей узла трения в результате трибохимических реакций увеличивает микротвердость поверхностного слоя стали и его износостойкость [16]. Однако для улучшения всех эксплуатационных характеристик смазочных композиций желательным является введение в структуру частиц ПТК химических элементов, которые также обеспечат увеличение критической нагрузки и нагрузки сваривания трущихся поверхностей стали. Прежде всего это относится к фосфору и сере. Сера входит в состав дисульфида молибдена, являющегося наиболее распространенной антифрикционной добавкой, и обеспечивает увеличение нагрузки сваривания при использовании смазочных композиций на ее основе. Однако в ходе эксплуатации узла трения в присутствии влаги наличие серы способствует формированию серной кислоты и коррозии трущихся поверхностей [17, 18]. С другой стороны, фосфор традиционно вводится в состав смазочных композиций в виде токсичных фосфорорганических соединений (присадки на основе органических производных фосфорных и фосфористых кислот, их средних эфиров и солей кислых эфиров) [18], что создает дополнительные проблемы.

При более низкой стоимости добавки МПТК превосходят добавки дисульфида молибдена по своему влиянию на коэффициент трения и износостойкость, однако по влиянию на величину критической нагрузки и нагрузки сваривания уступают ему [17, 18]. В этой связи нами была исследована возможность прямого введения фосфора в состав ПТК непосредственно в ходе его синтеза, а также изучено влияние добавок полученного продукта на трибологические характеристики стандартных смазочных композиций. При этом синтез полититаната калия осуществляли взаимодействием TiO_2 с гидроксидно-солевым расплавом в

соответствии с методикой [10], однако нитрат калия был заменен на двузамещенный гидрофосфат калия. Известно [19, 20], что по отношению к простым оксидам и оксидным системам при повышенных температурах механизм действия расплавов гидроксидов и фосфатов щелочных металлов аналогичен. При этом в качестве продуктов образуются смешанные оксиды, в частности силикофосфаты. В этой связи предполагалось, что в анализируемой системе в качестве продукта могут быть получены квазиаморфные полититанаты-полифосфаты калия, которые могут быть использованы как комплексные антифрикционные добавки в узлах трения благодаря присутствию в их составе фосфора, положительно влияющего на увеличение нагрузки сваривания трущихся поверхностей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез проводили аналогично методике, представленной в работе [10], путем обработки порошка TiO_2 (рутил, Aldrich, 99.5% чистоты, средний размер частиц 8 мкм) в расплаве, содержащем гидроксид калия (х. ч., ГОСТ 24363-80) и двузамещенный фосфат калия (ч. д. а., ГОСТ 2493-75) вместо нитрата калия. Гомогенизированные с помощью валковой шаровой мельницы смеси помещали в платиновый тигель и подвергали термической обработке в электропечи при $500^\circ C$ в течение 2 ч.

Массовая доля компонентов в исследованных реакционных смесях, а также состав расплава, в котором проводили синтез, указаны в табл. 1. При расчете оксидного состава расплава учитывали, что реальный состав реактивов, использованных для синтеза, соответствует $KOH \cdot 0.5H_2O$ и $KH_2PO_4 \cdot 3H_2O$, а нагрев реакционной смеси до $500^\circ C$ (температура синтеза) приводит к полной потере системой молекулярной воды.

По окончании синтеза расплав вместе с содержащим продуктом выливали в воду и трижды отмывали от водорастворимых исходных компонентов и продуктов путем последовательного промывания дистиллированной водой, взятой в весовом соотношении 1 : 20 к содержащему тигля, и декантации раствора после отстаивания. Полученный порошкообразный продукт просушивали при $50^\circ C$ в сушильном шкафу в течение 4 ч и исследовали различными методами.

Морфологию частиц синтезированных порошков изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) TESLA 5M и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Aspect Explorer, оснащенного энергодисперсионным анализатором, а точный химический состав — с помощью рентгеновского флуоресцентного анализатора Спектроскан Макс-GV. Фазовый со-

Таблица 1. Химический состав исследованных реакционных смесей

№ состава	Содержание компонентов в сырьевой смеси, мас. %					
	исходный состав			состав после обезвоживания		
	$\text{KН}_2\text{PО}_4 \cdot 3\text{Н}_2\text{O}$	$\text{KOH} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	TiO_2	$\text{KН}_2\text{PО}_4$	KOH	TiO_2
1	20.0	26.7	53.3	16.2	25.5	58.3
2	17.6	35.3	47.1	14.3	33.9	51.8
3	25.0	33.3	41.7	20.7	32.6	46.7
4	21.4	42.9	35.7	17.8	42.1	40.1
5	33.3	33.3	33.3	28.3	33.4	38.2
6	28.6	42.9	28.6	24.2	43.0	32.8
7	36.4	40.8	22.8	31.5	41.8	26.7

став полученного продукта определяли с помощью рентгеновского дифрактометра AgI X'ra . Содержание рентгеноаморфной фазы рассчитывали с использованием стандартного программного обеспечения данного прибора (WinXRD.2.0).

Для исследования трибологических свойств порошки синтезированных продуктов (3 весовые части) диспергировали в машинном масле марки И-20 (97 весовых частей) с помощью смесительного устройства УППС-1. Испытания полученных модельных смазочных композиций проводили по ГОСТ 9490-75 (Материалы смазочные жидкие и пластичные) на стандартной четырехшариковой машине трения МТУ-1М. Узел трения четырехшариковой машины представлял собой пирамиду из четырех контактирующих друг с другом шариков. Три нижних шарика закрепляли неподвижно в чашке машины с испытуемым смазочным материалом. Верхний шарик, закрепленный в шпинделе машины, вращался относительно трех нижних под нагрузкой 100 Н с частотой 1400 ± 7 об/мин. Измерения при определении показателя износа проводили в течение 60 мин с регистрацией величины момента силы трения каждые 3 мин.

Для проведения трибологических испытаний использовали шарики диаметром 12.70 ± 0.01 мм, изготовленные из стали ШХ-15 (ГОСТ 801-78) в соответствии с ГОСТ 3722-81. При проведении испытаний противоизносные свойства композиций оценивали по диаметру пятна износа $D_{\text{и}}$, антифрикционные — по величине момента силы трения в контакте деталей пары трения $M_{\text{тр}}$. Каждый опыт проводили с новой пробой испытуемой композиции и новым набором шариков. Эксперименты повторяли трехкратно.

Перед началом каждого испытания все детали машины, с которыми соприкасается испытуемый смазочный материал, промывали изопропанолом и просушивали на воздухе в течение 1 ч. Шарик до и после эксперимента промывали несколько

ми порциями растворителя и просушивали на воздухе в течение 1 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеновские дифрактограммы некоторых продуктов взаимодействия расплавов системы $\text{KOH}-\text{KН}_2\text{PО}_4$ с порошком рутила (TiO_2) представлены на рис. 1, а их химический состав и содержание рентгеноаморфной фазы — в табл. 2. Согласно полученным данным, увеличение доли гидроксидно-солевого расплава в реакционной системе способствует более интенсивному химическому взаимодействию с ним порошка оксида титана. Использование реакционных смесей с более высоким содержанием KOH (состав 6) позволяет получить продукт, в котором присутствие кристаллической фазы остаточного непрореагировавшего рутила незначительно (<5 мас. %).

При сравнении результатов анализа продуктов, полученных в смесях 4 и 5, содержащих примерно одинаковое количество TiO_2 , видно, что взаимодействие расплава с оксидом титана происходит более интенсивно в расплаве 4 ($[\text{KOH}] > [\text{KН}_2\text{PО}_4]$), чем в расплаве 5 ($[\text{KOH}] < [\text{KН}_2\text{PО}_4]$), однако содержание оксида фосфора в полученном продукте незначительно. В связи с этим продукт, синтезированный из реакционной смеси 6, более предпочтителен, поскольку имеет наименьшее содержание остаточной кристаллической фазы рутила и достаточно высокое содержание P_2O_5 . В продукте же, полученном с использованием реакционного состава 4, присутствует большое содержание кристаллического TiO_2 (12 мас. %), абразивные свойства которого делают проблематичным его использование в качестве антифрикционной добавки.

Согласно данным ПЭМ и СЭМ (рис. 2 и 3), морфология квазиаморфных частиц модифицированного полититаната калия, полученного во всех исследованных смесях, идентична морфологии частиц ПТК, синтезированных в аналогич-

Таблица 2. Химический состав продуктов, полученных в системе $\text{TiO}_2\text{--KOH--KH}_2\text{PO}_4$ при 500°C (2 ч), после промывания водой и содержание в них рентгеноаморфной фазы (относительная погрешность $\pm 10\%$)

№ состава	Содержание оксида, мас. %			Содержание аморфной фазы, мас. %
	K_2O	TiO_2	P_2O_5	
1	14.3	85.7	Следы	53
2	17.6	82.3	0.1	64
3	19.5	79.8	0.8	70
4	19.7	78.6	1.0	86
5	19.6	77.8	2.6	78
6	19.1	77.1	3.8	96
7	18.8	71.3	9.9	72

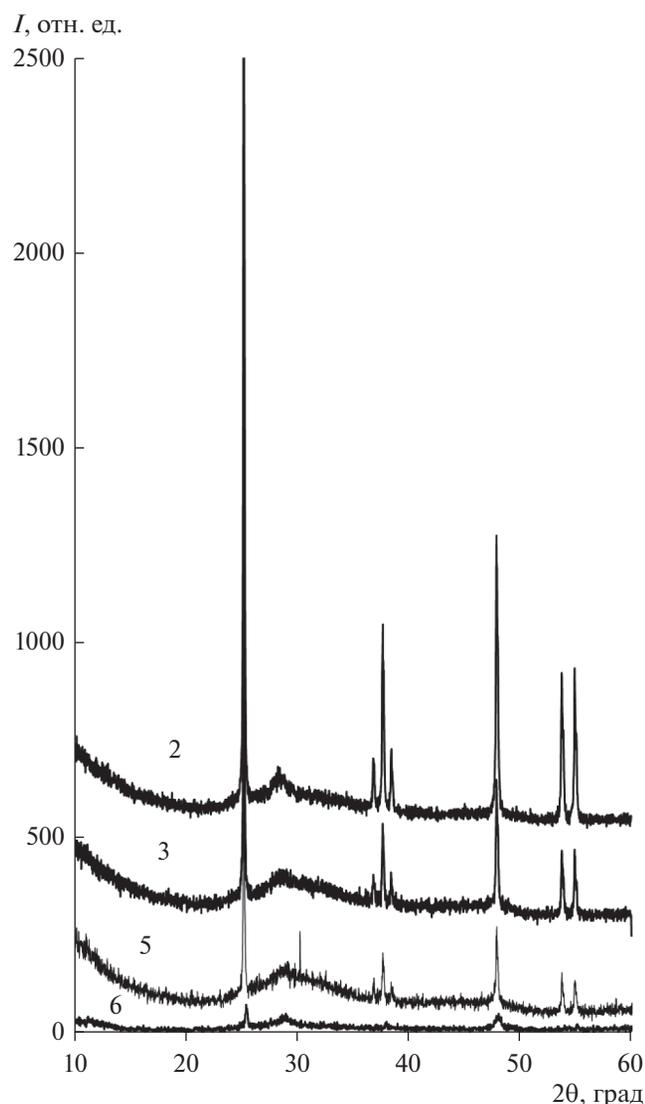


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы продуктов, полученных при использовании различных составов сырьевых смесей системы $\text{TiO}_2\text{--KOH--KH}_2\text{PO}_4$ (номер кривой соответствует номеру состава в табл. 1).

ных условиях в расплавах системы KOH--KNO_3 согласно [10] при термической обработке смеси на основе системы $\text{TiO}_2\text{--KOH--KNO}_3$. Основное отличие заключается в более высоком остаточном количестве частиц рутила (TiO_2) в продуктах, синтезированных в системе $\text{TiO}_2\text{--KOH--KH}_2\text{PO}_4$. Однако размер частиц ПТК, формирующих агрегаты в продуктах, полученных в расплавах системы $\text{KOH--KH}_2\text{PO}_4$, меньше, а упорядоченность их структуры ниже (рис. 2). Можно предположить, что наноразмерные слоистые частицы ПТК, образующиеся в результате взаимодействия структурных фрагментов TiO_2 , перешедших в расплав при охлаждении, скрепляются через структурные фрагменты полифосфатов, также формирующихся в расплаве. Подобное структурообразование в расплавах фосфатов отмечалось и ранее при температурах $\sim 500^\circ\text{C}$ в процессах структурообразования фосфатных стекол [20, 21]. В результате формируются более разупорядоченные аморфные образования.

Учитывая, что синтезируемый продукт представляет интерес как антифрикционная добавка к смазочным композициям, предназначенным для увеличения нагрузки сваривки (критической нагрузки), связанной с увеличением содержания фосфора, был также получен продукт на основе сырьевой смеси с пониженным содержанием диоксида титана, но с повышенным содержанием KH_2PO_4 (состав 7). Рентгеновская дифрактограмма полученного продукта приведена на рис. 4, а электронная фотография его частиц (СЭМ) — на рис. 2.

В результате изменения соотношения между количеством гидроксидно-фосфатного расплава и порошка TiO_2 полученный продукт отличается от своего аналога, синтезированного с использованием реакционной смеси 6. Количество аморфной фазы в нем уменьшилось, а в качестве основной

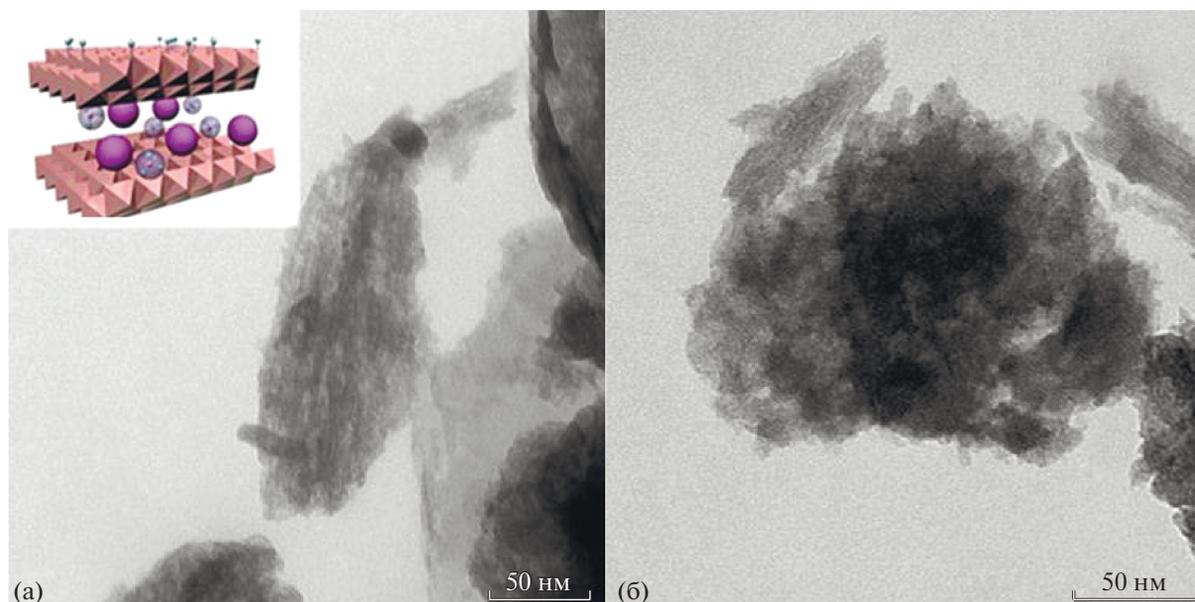


Рис. 2. Электронные фотографии (ПЭМ) частиц продукта, синтезированного при 500°C, в системах TiO_2 – KOH – KNO_3 (30 : 30 : 40) (а), на вставке – структура ПТК; TiO_2 – KOH – KH_2PO_4 (состав 6) (б).

кристаллической фазы выступает сложный оксид состава $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$, наблюдается также присутствие незначительной примеси рутила. Данные элементного анализа (табл. 2) указывают на существенное увеличение содержания фосфора в конечном продукте, а данные электронной микроскопии – на появление в составе продукта кристаллов $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$ столбчатой формы (рис. 3). В то же время чешуйчатые частицы аморфной части продукта несколько изменяют свою форму (эффект “бахромы”). Это позволяет предположить, что увеличение (по сравнению с TiO_2) содержания фосфата в реакционной системе способствует не только формированию кристаллов $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$, но и полному встраиванию фосфат-ионов в слоистую структуру аморфного ПТК преимущественно в виде краевых комплексов, структурный мотив которых изменяется от подобного лепидокрокиту, характерного для полититаната калия [10], к подобному лангбейниту, свойственному $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$ [22].

Результаты трибологических испытаний продуктов, синтезированных на основе сырьевых смесей 6 и 7 в составе смазочной композиции на основе базового масла И-20 в сопоставлении с данными, полученными при введении в состав композиции полититаната калия, полученного при термической обработке системы TiO_2 – KOH – KNO_3 (массовое соотношение 3 : 3 : 4) при 500°C (2 ч), представлены в табл. 3. Полученные результаты показывают, что добавки, представляющие собой полититанаты калия, синтезированные при обработке порошков TiO_2 в расплавах системы KOH – KH_2PO_4 ,

значительно улучшают антифрикционные (μ), противозадирные (PB) и противоизносные (d) свойства смазочных композиций на основе базового масла И-20 (как без добавок, так и с добавкой ПТК, синтезированного с использованием расплава KOH – KNO_3). При этом значение нагрузки сваривания увеличивается пропорционально содержанию фосфора в составе модифицированного ПТК (сравни данные для составов на основе смесей 6 и 7), что хорошо согласуется с известным эффектом положительного влияния фосфора, входящего в состав антифрикционных добавок, на стойкость трущихся стальных поверхностей к холодному свариванию при высоких нагрузках [17, 18]. В то же время присутствие в составе продукта, полученного на основе смеси 7, кристаллического $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$ приводит к некоторому снижению антифрикционных (μ) и противоизносных (d) свойств полученной смазочной композиции в сравнении с рентгеноаморфным продуктом на основе смеси 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обработке порошков диоксида титана в расплавах системы KOH – KH_2PO_4 могут быть синтезированы рентгеноаморфные продукты, представляющие собой полититанаты калия, модифицированные фосфором, или их смеси с кристаллическим $\text{K}_2\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3$. Слоистая структура полученных соединений придает им высокие антифрикционные и противоизносные характеристики, а присутствие в составе фосфора обеспечивает высокие противозадирные свойства при использова-

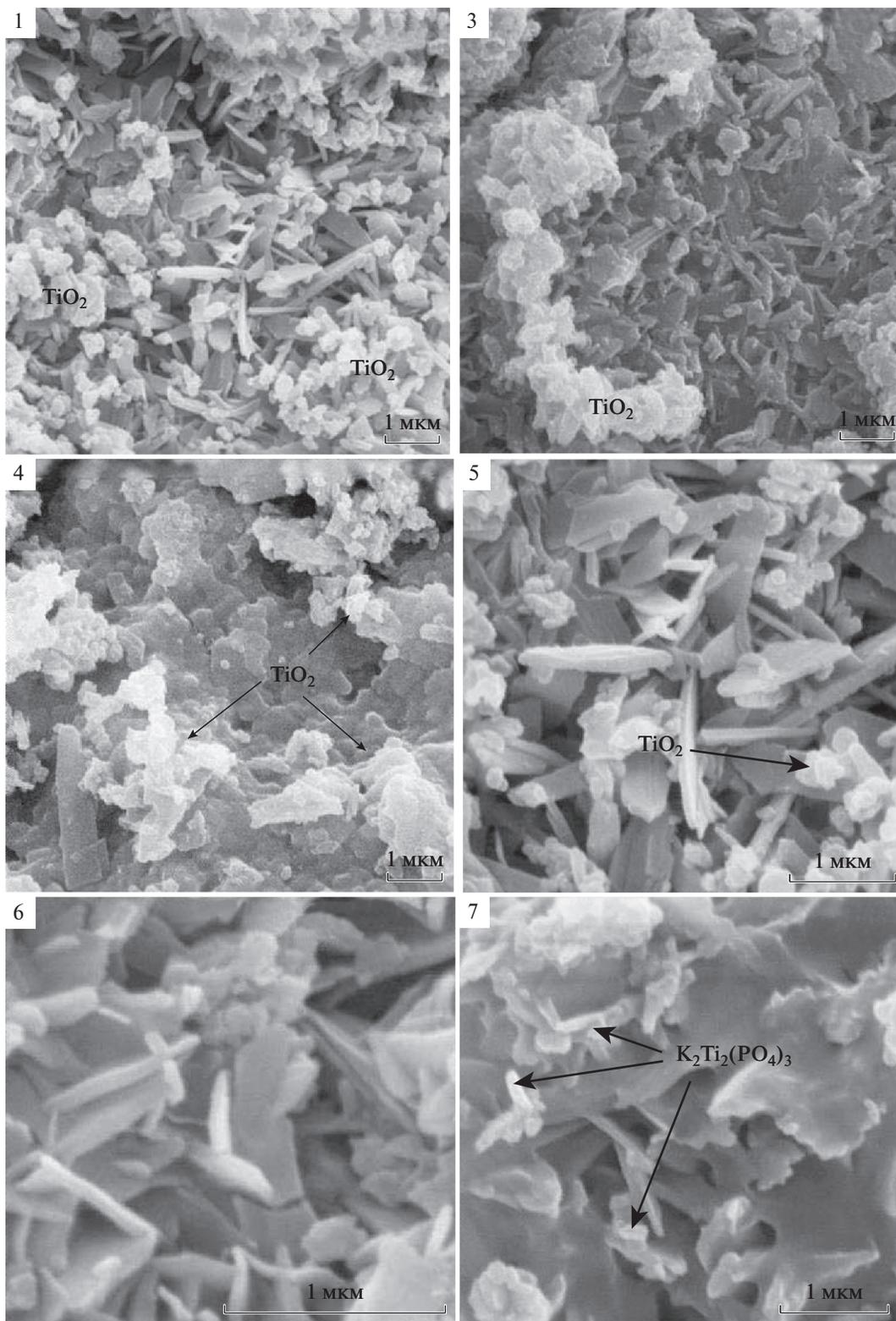


Рис. 3. Электронные фотографии (СЭМ) порошков, синтезированных в различных реакционных смесях системы $\text{TiO}_2\text{-KOH-KH}_2\text{PO}_4$, увеличение $\times 25000$. Идентификация кристаллов дана на основании локального рентгеновского микроанализа.

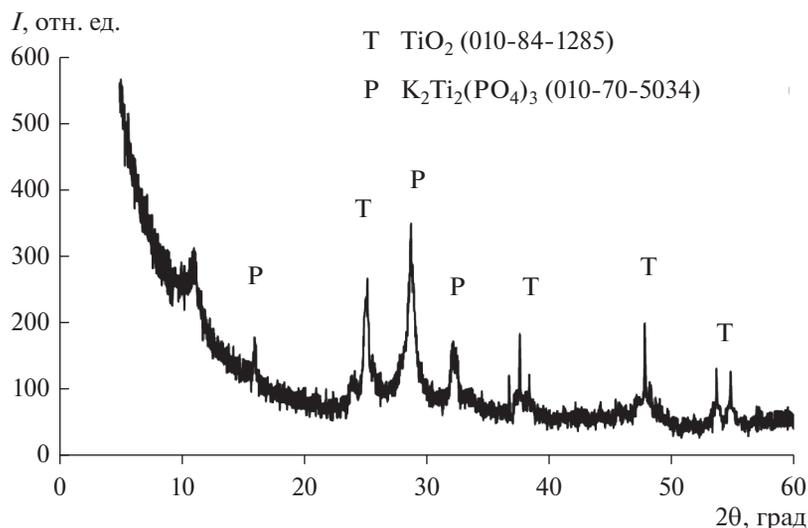


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма продукта, синтезированного с использованием сырьевой смеси 7.

Таблица 3. Трибологические характеристики смазочных композиций на основе базового масла И-20, содержащих антифрикционные добавки синтезированных продуктов (3 мас. %). *d* – диаметр пятна износа, *PВ* – нагрузка сваривания, μ – среднее значение коэффициента трения в течение 1 ч

Тип добавки	<i>d</i> , мкм	<i>PВ</i> , Н	μ
Без добавок	670 ± 21	1350 ± 50	0.110 ± 0.010
Добавка ПТК	466 ± 21	1600 ± 50	0.085 ± 0.007
Добавка продукта на основе смеси 6	408 ± 13	1850 ± 50	0.060 ± 0.003
смеси 7	415 ± 11	1950 ± 50	0.072 ± 0.004

нии в составе смазочных композиций. Комплексный характер влияния полученных продуктов на трибологические характеристики смазочных композиций на их основе выгодно отличает их от других аналогичных материалов. Так, добавки природных серпентинитов, представляющих собой слоистые силикаты магния, оказывают положительное влияние только на антифрикционные и противоизносные свойства смазочных материалов [23, 24], а добавки, существенно улучшающие противоизносные свойства смазочных композиций, например наночастицы CaCO₃, Cu@C и CeO₂ [25–27], слабо влияют на коэффициент трения и износостойкость трущихся поверхностей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 10.1434.2017.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makarova M., Dejneka A., Franc J. et al. // Opt. Mater. 2010. V. 32. № 8. P. 803. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.01.007>
2. Agafonov A.V., Afanas'ev D.A., Borilo L.P. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2016. V. 61. № 5. P. 560. [Агафонов А.В., Афанасьев Д.А., Борило Л.П. и др. // Журн. неорганической химии. 2016. Т. 61. № 5. С. 588.] <https://doi.org/10.1134/S0036023616050028>
3. Maluangnont T., Chanlek N., Suksawad T. et al. // Dalton Trans. 2017. V. 46. № 41. P. 14277. <https://doi.org/10.1039/C7DT03092D>
4. Bugrov A.N., Abdulaeva L.D., Silyukov O.I. et al. // Ceram. Int. 2016. V. 42. P. 1698. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.125>

5. *Moura F., Simões A.Z., Deus R.C. et al.* // *Ceram. Int.* 2013. V. 39. P. 3499.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.11.034>
6. *Godneva M.M., Rys'kina M.P., Mikhailova N.L. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2019. V. 64. № 2. P. 262. [*Годнева М.М., Рыськина М.П., Михайлова Н.Л. и др.* // *Журн. неорган. химии.* 2019. Т. 64. № 2. С. 218.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023619020086>
7. *Chupakhina T.I., Mel'nikova N.V., Kadyrova N.I. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2019. V. 64. № 5. P. 565. [*Чупахина Т.И., Мельникова Н.В., Кадырова Н.И. и др.* // *Журн. неорган. химии.* 2019. Т. 64. № 5. С. 453.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023619040089>
8. *Kim T.W., Ha H.-W., Paek M.-J. et al.* // *J. Phys. Chem. C.* 2008. V. 112. № 38. P. 14853.
<https://doi.org/10.1021/jp805488h>
9. *Steblevskaya N.I., Medkov M.A., Belobeletskaia M.V. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2015. V. 60. № 11. P. 1337. [*Стеблевская Н.И., Медков М.А., Белобелецкая М.В. и др.* // *Журн. неорган. химии.* 2015. Т. 60. № 11. С. 1461.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023615110169>
10. *Sanchez-Monjaras T., Gorokhovskiy A.V., Escalante-Garcia J.I.* // *J. Am. Ceram. Soc.* 2008. V. 91. № 9. P. 3058.
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02574.x>
11. *Xu J., Zhang H., Li W. et al.* // *Micro & Nano Lett.* 2012. V. 7. № 7. P. 654.
<https://doi.org/10.1049/mnl.2012.0376>
12. *Tretyachenko E.V., Gorokhovskiy A.V., Yurkov G.Y. et al.* // *Particuology.* 2014. V. 17. P. 22.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.12.002>
13. *Zimnyakov D.A., Sevrugin A.V., Yuvchenko S.A. et al.* // *Data in Brief.* 2016. V. 7. P. 1383.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.04.015>
14. *Goffman V.G., Gorokhovskiy A.V., Kompan M.M. et al.* // *J. Alloys. Compd.* 2014. V. 615. № S1. P. S526.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.121>
15. *Gorshkov N.V., Goffman V.G., Vikulova M.A. et al.* // *J. Compos. Mater.* 2018. V. 52. № 1. P. 135.
<https://doi.org/10.1177/0021998317703692>
16. *Tsiganov A., Krivonogova A., Nikityuk T. et al.* // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. № 560. P. 012191.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012191>
17. *Rudnick L.R.* *Lubricant Additives: Chemistry and Applications.* NY: CRS Press, 2010. 796 p.
18. *Заславский Ю.С.* *Трибология смазочных материалов.* М.: Химия, 1991. 240 с.
19. *Безбородов М.А.* *Химическая устойчивость силикатных стекол.* Минск: Наука и техника, 1972. 304 с.
20. *Ещенко Л.С., Жук Г.М., Сумич А.И.* // *Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ.* 2008. № 3. С. 56.
21. *Waclawska I., Szumera M.* // *J. Alloys Compd.* 2009. V. 468. № 1–2. P. 246.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.12.093>
22. *Zatovsky I.V., Strutynska N.Yu., Hizhnyi Yu.A. et al.* // *Chem. Open.* 2018. № 7. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/open.201800059>
23. *Yu H., Xu Y., Shi P. et al.* // *Wear.* 2013. V. 297. P. 802.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.10.013>
24. *Qi X., Jia Z., Yang Y. et al.* // *Tribology Int.* 2011. V. 44. P. 805.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.02.001>
25. *Ji X., Chen Y., Zhao G. et al.* // *Tribology Lett.* 2011. V. 41. № 1. P. 113.
<https://doi.org/10.1007/s11249-010-9688-z>
26. *Viesca J.L., Hernandez Battez A., Gonzalez R. et al.* // *Tribology Int.* 2011. V. 44. P. 829.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.02.006>
27. *Gupta R.N., Harsha A.P.* // *Lubr. Sci.* 2018. V. 30. № 4. P. 175.
<https://doi.org/10.1002/ls.1415>