

УДК 546.05

## ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ТИТАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ОТХОДОВ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2024 г. А. А. Свиныхова<sup>1,\*</sup>, С. А. Янковский<sup>1,\*\*</sup>, А. Д. Мисюкова<sup>1,\*\*\*</sup>, А. Я. Пак<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО НИ ТПУ Инженерная школа энергетики, Томск, 634050 Россия

\*e-mail: aag109@tpu.ru

\*\*e-mail: jankovsky@tpu.ru

\*\*\*e-mail: adm14@tpu.ru

\*\*\*\*e-mail: ayapak@tpu.ru

Поступила в редакцию 30.09.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 20.12.2023 г.

Приведены результаты получения карбида титана безвакуумным электродуговым методом с применением различного рода биоуглерода, полученного классическим пиролизом отходов биомассы, таких как цедра мандарина, цедра помело, банановая кожура, скорлупа кедровых орехов, скорлупа грецких орехов. Анализ рентгеновских дифрактограмм синтезированных материалов показал повторяемость эксперимента с получением дифракционных максимумов, указывающих на формирование кубической структуры карбида титана. Анализ термического окисления полученных порошков показал, что до 1000°C процесс протекает достаточно медленно, но с повышением температуры скорость окисления существенно увеличивается. Установлено, что при термическом нагреве в окислительной среде масса исследуемых порошков карбида титана, полученных с использованием различных видов углерода, увеличивается, что подтверждает термогравиметрический анализ.

Ключевые слова: карбид титана, биоуглерод, рентгеновская дифрактограмма, пиролиз, биомасса

DOI: 10.31857/S0023117724030073 EDN: NBYDRG

### ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературная керамика является одним из перспективных направлений современного материаловедения, так как у промышленности растет спрос на материалы, способные выдерживать критические температуры, высокие нагрузки и использование в агрессивных средах. Один из представителей высокотемпературной керамики – карбид титана (TiC). TiC обладает большим спектром уникальных свойств, таких как жаропрочность, тугоплавкость, высокая твердость, коррозионная стойкость, каталитическая активность и химическая инертность [1]. Карбид титана широко применяется в различных отраслях современной промышленности. Например, для изготовления конструкционной керамики, в фотокатализе, для изготовления конденсаторов с высокой плотностью энергии [2–7]. Одним из методов очистки воздуха от CO<sub>2</sub> является использование селективных газовых фильтров, которые изготавливают с применением карбида титана [8].

Для получения TiC используют источник титана (чистый титан, оксид титана, титановая руда) и источник углерода, в качестве которого может применяться биоуглерод. Карбид титана, синтезированный с использованием биоуглерода, имеет различные конфигурации углеродных матриц за счет того, что исходный углерод был получен из широкого круга биологического материала. Каждый вид биоуглерода, в свою очередь, имеет уникальную структуру и сохраняет ее при взаимодействии с титаном.

Как правило, углерод получают путем пиролиза биомассы, которая представляет собой биологический материал, полученный прямо или косвенно, путем фотосинтеза, чаще всего из растений или других материалов природного происхождения. Пиролиз – один из наиболее перспективных и широко используемых методов среди других термохимических процессов [9–12], представляет собой термическое разложение биомассы в среде высоких температур (600–800°C) при отсутствии кислорода.

На эффективность процесса пиролиза и качество получаемого углерода влияют несколько факторов: температура, скорость нагрева, размер частиц загружаемой в реактор биомассы, конфигурация реактора и время пребывания материала внутри реактора [13–17]. Эти факторы определяют удобство получения углерода из биомассы методом пиролиза, так как с помощью изменения температуры и скорости нагрева процесс можно регулировать. В зависимости от времени пребывания биомассы в реакторе процесс пиролиза можно классифицировать на медленный, быстрый и мгновенный [18].

Для производства углеродных материалов наиболее подходящим методом является медленный пиролиз, так как он имеет высокий выход твердой фазы в отличие от быстрого пиролиза [19, 20]. Медленный пиролиз характеризуется скоростью нагрева до 30°С/мин при температуре 400–800°С. Время пребывания сырья в реакторе в данном случае составляет от 10 до 60 мин. Это способствует образованию твердофазных продуктов, тогда как при быстром пиролизе основным продуктом на выходе является газовая фаза [21].

Температура, при которой происходит процесс пиролиза, также играет немаловажную роль. Согласно исследованиям, при температуре пиролиза ниже 300°С эффективность конверсии биомассы ниже 20%, тогда как при пиролизе в диапазоне температур 300–800°С эффективность составляет 90% от общей массы загружаемого в реактор сырья [16, 17].

Широкое использование лигноцеллюлозной биомассы для получения углерода связано с ее контролируемой структурой, низкой стоимостью и распространенностью [22]. О распространенности биомассы в мире можно судить по тому, что в год во всем мире производится порядка 100 млрд т отходов биомассы [23].

Такой лигноцеллюлозный материал, как кожура банана, цедра мандарина, цедра помело, скорлупа кедрового и грецкого орехов, характеризуется высоким содержанием лигнина, углеводов, что говорит о высокой реакционной способности углерода, получаемого из этого материала [24].

Карбид титана может быть получен такими способами, как карботермическое восстановление, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, электровзрыв проводников, методы лазерной абляции и различные плазмен-

ные методы [4–6] и [25–27]. Все методы синтеза предполагают наличие инертной среды для исключения окисления продукта синтеза. Однако наличие инертной среды обеспечивается с помощью вакуумного оборудования (герметичный реактор, каскады вакуумных насосов, баллоны с инертным газом), что усложняет технологию, увеличивая время подготовки к эксперименту, а также увеличивая энергоемкость процесса синтеза. Использование безвакуумного электродугового метода предотвращает окисление продукта синтеза за счет активной генерации защитной атмосферы, состоящей из СО и СО<sub>2</sub>. В процессе горения дугового разряда происходит эродирование графита с анода на катод. Углерод реагирует с кислородом воздуха и, создавая защитную атмосферу, препятствует попаданию кислорода воздуха в реакционную зону.

Цель работы – исследование возможностей использования биомассы в качестве источника углерода для безвакуумного электродугового синтеза карбида титана.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования были выполнены на лабораторном электродуговом стенде. Источник постоянного тока – выпрямительно-инверторный преобразователь с рабочим током до 200 А. Основные элементы стенда – графитовые электроды. Графитовый анод был выполнен в форме стержня диаметром 8 мм, катод в форме полого цилиндра высотой 30 мм и диаметром 20 мм. Инициация электрического разряда осуществлялась касанием анода о катод и поддерживалась путем отведения анода от катода на ~0.5 мм. Регистрация электрических параметров осуществлялась цифровым двухканальным осциллографом *Rigol 1052 E*.

Для подготовки смеси прекурсоров был использован коммерческий порошок титана с размером частиц от 5 до 20 мкм и чистотой не менее 99% (“Редкий металл”), а также биоуглерод, являющийся продуктом парового пиролиза биологических растительных отходов.

Для получения биоуглерода использовалась навеска каждого образца биомассы: цедра мандарина, цедра помело, кожура банана, высушенного до сухого состояния, а также измельченная скорлупа кедровых и грецких орехов. Каждую навеску с образцом биомассы взвешивали на аналитических весах *VIBRA HT-224RCE* и поме-

шали в термостойкий стальной контейнер (масса каждой навески составляла  $300 \pm 2$  г). Термостойкий стальной контейнер с одним образцом биомассы помещался в муфельную печь марки ПМ-1400. К термостойкому стальному контейнеру подводился патрубок для отвода газов, отвод газов осуществлялся через вентиляционную шахту. Нагрев температуры в печи осуществлялся со скоростью  $20 \pm 1^\circ\text{C}/\text{мин}$  до достижения заданного значения ( $600^\circ\text{C}$ ) время выдержки составляло 1 ч, далее поддержание температуры останавливалось, и терморегулируемая печь охлаждалась естественным путем до комнатной температуры. Полученный углерод извлекался, выполнялось его взвешивание. Подобные манипуляции повторялись для каждой исследуемой навески биомассы. Далее полученные образцы углерода дополнительно измельчались на лабораторной мельнице *LM-1000* (“*Stegler*”), после измельчения углеродные порошки просеивались через сито 80 мкм.

Технический анализ биомассы и углерода, полученного из нее, выполнялся в соответствии с общепринятыми стандартами (калорийность ISO 1928: 2009 “Solid mineral fuel. Determination of gross calorific value and calculation of net calorific value”, зольность ISO 1171: 2010 “Solid mineral fuels – Determination of ash, влажность ISO 589: 2008 “Hard coal – Determination of total moisture”, выход летучих ISO 562: 2010 “Hard coal and coke – Determination of volatile matter”).

Порошки титана и углерода были взяты в стехиометрическом соотношении и гомогенизировались в шаровой вибрационной мельнице (*Retsch MM 500 nano*) в течение 20 мин при частоте 20 Гц. После гомогенизации смесь исходных реагентов (1 г) помещали в графитовый катод и воздействовали электродуговой плазмой в течение 30 с при силе тока 150 А. После высокотемпературного воздействия продукт синтеза изымали из графитового электрода и проводили анализы.

Рентгенофазовый анализ проводился с помощью рентгеновского дифрактометра *Shimadzu XRD 7000* с-излучения ( $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$ ).

Анализ термической конверсии образцов был выполнен с помощью дифференциального-термического анализатора *Netzsch STA 449 F3 Jupiter*. Исследования проводились при скорости нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$  в корундовом тигле с перфорированной крышкой до температуры  $1000^\circ\text{C}$  с целью полного его термического разложения в окисли-

тельной среде (воздух). Образец массой  $\sim 20$  мг распределялся ровным слоем по дну тигля и помещался в поток окислительной среды. Скорость газового потока составляла 150 мл/мин. Все эксперименты проводились в условиях атмосферного давления. Сравнительная оценка параметров процесса термического разложения синтезированных материалов проводилась на основании физических величин (температура, время и скорость процесса), вычисленных графическим методом с помощью ТГ-, ДТГ- и ДСК-кривых.

Растровая электронная микроскопия была выполнена с помощью электронных микроскопов *Hitachi TM 3000* и *Tescan Vega SBU 3*.

Анализ процессов окисления осуществляли на экспериментальной установке, основными элементами которой являлись: камера сгорания в виде терморегулируемой печи ПМ-1400 с цифровым регулятором температуры (погрешность измерений  $\pm 1-3^\circ\text{C}$ ) объемом  $0.012 \text{ м}^3$ ; высокоскоростная видеокамера *FASTCAM S41* с форматом изображения  $1024 \times 1024$  пикселей, частотой съемки – 105 кадр/с; платформа координатного механизма, предназначенного для ввода в печь насыпки исследуемого образца с погрешностью перемещения в пространстве менее 1 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Перед проведением экспериментов выполнен технический анализ исходной биомассы и биоуглерода, полученного из нее. В первую очередь определены следующие параметры: теплота сгорания, влажность, зольность, выход летучих веществ. Результаты технического анализа приведены в табл. 1.

Технический анализ исходной биомассы показал, что все образцы имеют высокий выход летучих веществ и достаточно низкую зольность кроме образца банановой кожуры. Теплота сгорания биомассы для применения ее в энергетических целях является достаточно низкой, кроме образца кедровой скорлупы.

Термическая конверсия биомассы привела к существенному росту теплоты сгорания практически для всех образцов кроме образца банановой кожуры. Углерод, полученный из отходов пищевой промышленности после термической конверсии, становится более энергетически пригодным продуктом, но в нашем случае мы его рассматриваем в качестве компоненты к ис-

**Таблица 1.** Технические характеристики исходных компонент биомассы и биоуглерода, полученного из нее

Виды биомассы и биоуглерода	$A^d$	$W^a$	$V^{daf}$	$Q$
	мас. %			МДж/кг
Цедра мандарина	2.7	5	79.56	15.27
Цедра помело	2.63	5	80.13	15.86
Кожура банана	12.98	5	71.86	16.05
Кедровая скорлупа	7.63	1.59	80.15	20.39
Скорлупа грецкого ореха	1.1	3.7	69.3	17.8
Углерод из цедры мандарина	6.45	1.25	17.61	26.33
Углерод из цедры помело	7.89	1.2	18.2	25.92
Углерод из кожуры банана	32.04	3	24.09	18.17
Углерод из скорлупы кедрового ореха	2.1	2	14.3	31.6
Углерод из скорлупы грецкого ореха	3.9	1.7	13.6	32.7

$W^a$  – влажность исследовавшихся топлив;  $A^d$  – зольность исследовавшихся топлив;  $V^{daf}$  – выход летучих веществ исследовавшихся топлив;  $Q$  – теплота сгорания исследовавшихся топлив.

ходному порошку для формирования карбида титана.

Далее была выполнена растровая электронная микроскопия образцов биоуглерода с целью подтверждения пористой структуры, необходимой для дальнейшего эффективного смешивания с коммерческим порошком титана.

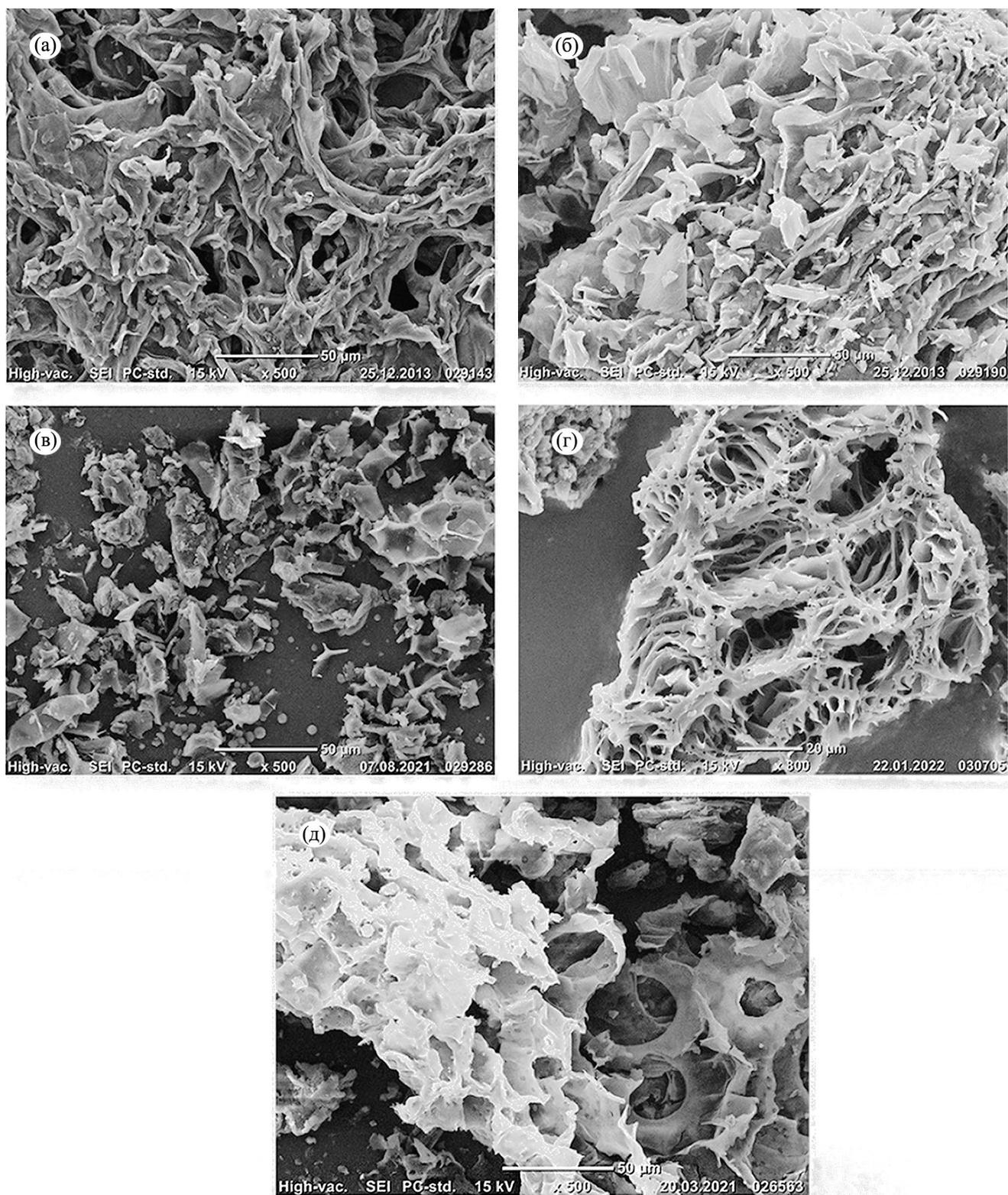
Результаты электронной микроскопии биоуглерода приведены на рис. 1, анализ которого позволяет сделать вывод, что несмотря на схожее происхождение цитрусовых, структура углерода существенно отличается друг от друга. Структура углерода из банановой кожуры имеет вид разрушенной пористой структуры в виде отдельных сложных остроугольных частиц. Углерод, полученный из скорлупы орехов, имеет мелкую пористую структуру с более округлыми и гладкими формами по сравнению с углеродным материалом, полученным из цедры цитрусовых и кожуры банана.

Далее для определения процессов окисления карбидов титана на воздухе был выполнен термогравиметрический анализ до температуры 1000°C. Результаты исследований приведены на рис. 2.

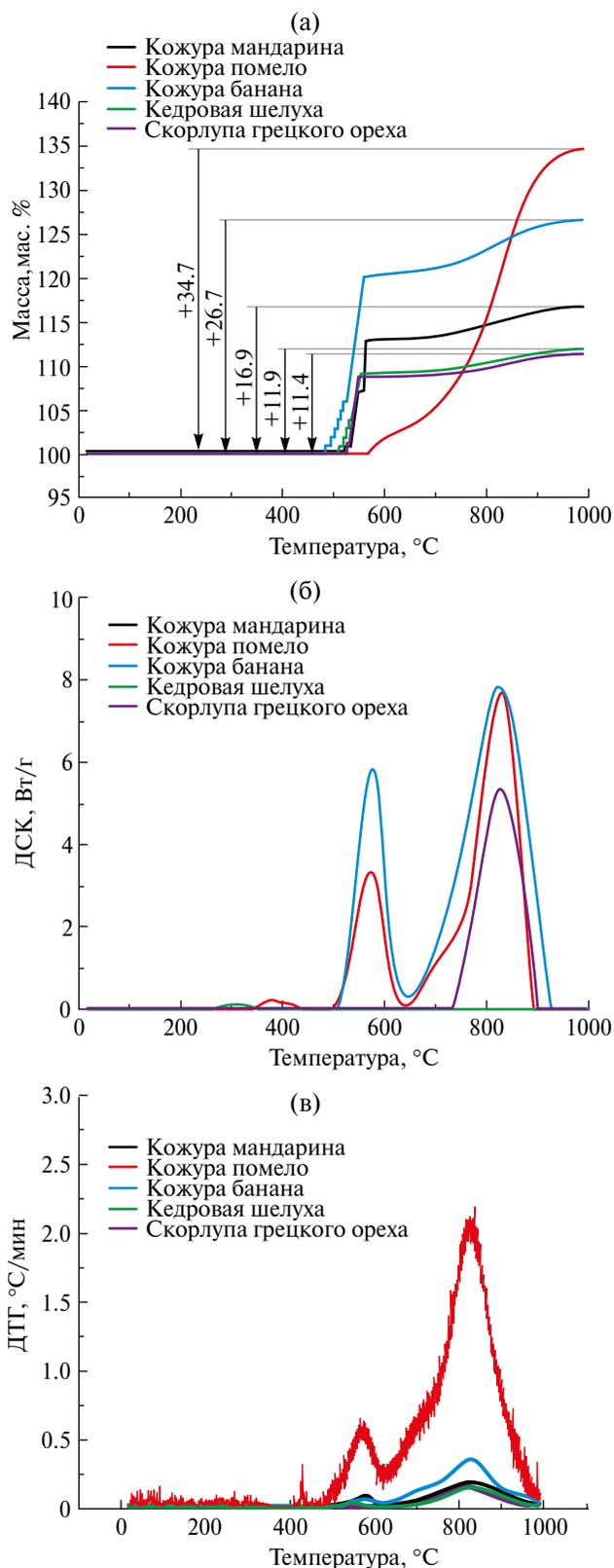
Из анализа рис. 2, а можно сделать следующие выводы: температура начала окисления карбида титана, полученного с применением углерода из кожуры банана составила ~484°C, полученного из углерода скорлупы кедровых орехов ~51°C, из мандариновой цедры ~521°C, из скорлупы грецкого ореха ~526°C, из цедры помело ~564°C. Процесс окисления карбидов

титана (рис. 2, б) происходит с существенным выделением энергии в интервале набора массы, пик максимального выделения энергии практически у всех образцов находится в диапазоне температур 820–830°C, для карбида титана с применением углерода из цедры помело и кожуры банана наблюдается максимальный пик выделения энергии – 7.7 и 7.6 Вт/г соответственно. Стоит отметить, что процесс окисления карбида титана, синтезированного безвакуумным электродуговым методом, протекает с существенным выделением энергии в диапазоне достаточно высоких температур. Данные ДСК рис. 2, в) позволяют установить, что максимальная скорость окисления, синтезированного на основе углерода, полученного из биомассы, протекала в интервале температур ~600–800°C. Изменение (увеличение) массы образцов свидетельствует об увеличении ее в широком диапазоне масс от – 11.4 до 34.7%, в зависимости от изменений вида углеродной составляющей.

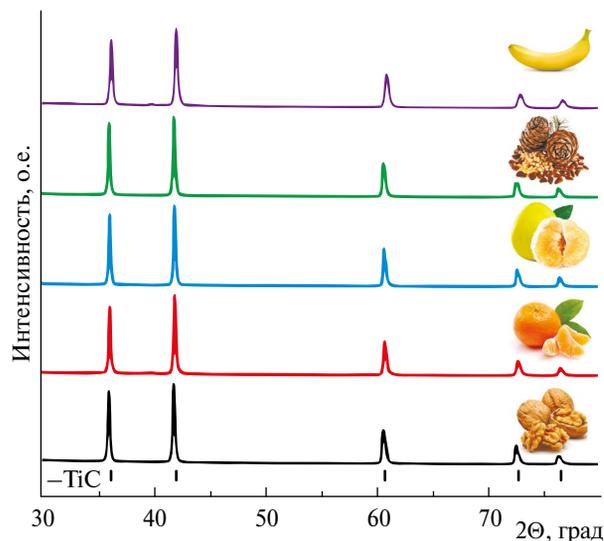
Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать вывод, что синтезированные образцы карбида титана обладают высокой окислительной стойкостью, что может быть связано с наличием углеродной матрицы и оксидной пленки, предотвращающей процессы окисления самого карбида. Параметры процесса окисления полученных карбидов титана протекают с увеличением массы (в окислительной среде) в пределах 11–35% и последующей стабилизацией массы при температурах выше 800°C. Подобные процессы окисления наблюдаются в работах других авторов, исследующих подобные материалы, но полученные отличными от нашего метода способами [28, 29].



**Рис. 1.** Результаты растровой электронной микроскопии углеродного остатка, полученного термической конверсией исходной биомассы: (а) углерод из цедры мандарина; (б) углерод из цедры помело; (в) углерод из кожуры банана; (г) углерод из скорлупы кедрового ореха; (д) углерод из скорлупы грецкого ореха.



**Рис. 2.** Данные ТГ (а), ДСК (б), ДТГ (в) для процесса окисления исследуемых образцов TiC, полученных с добавлением углерода из биомассы (среда – воздух, 100 мл/мин), скорость нагрева 10°C/мин, температурный интервал от 100 до 1000°C).



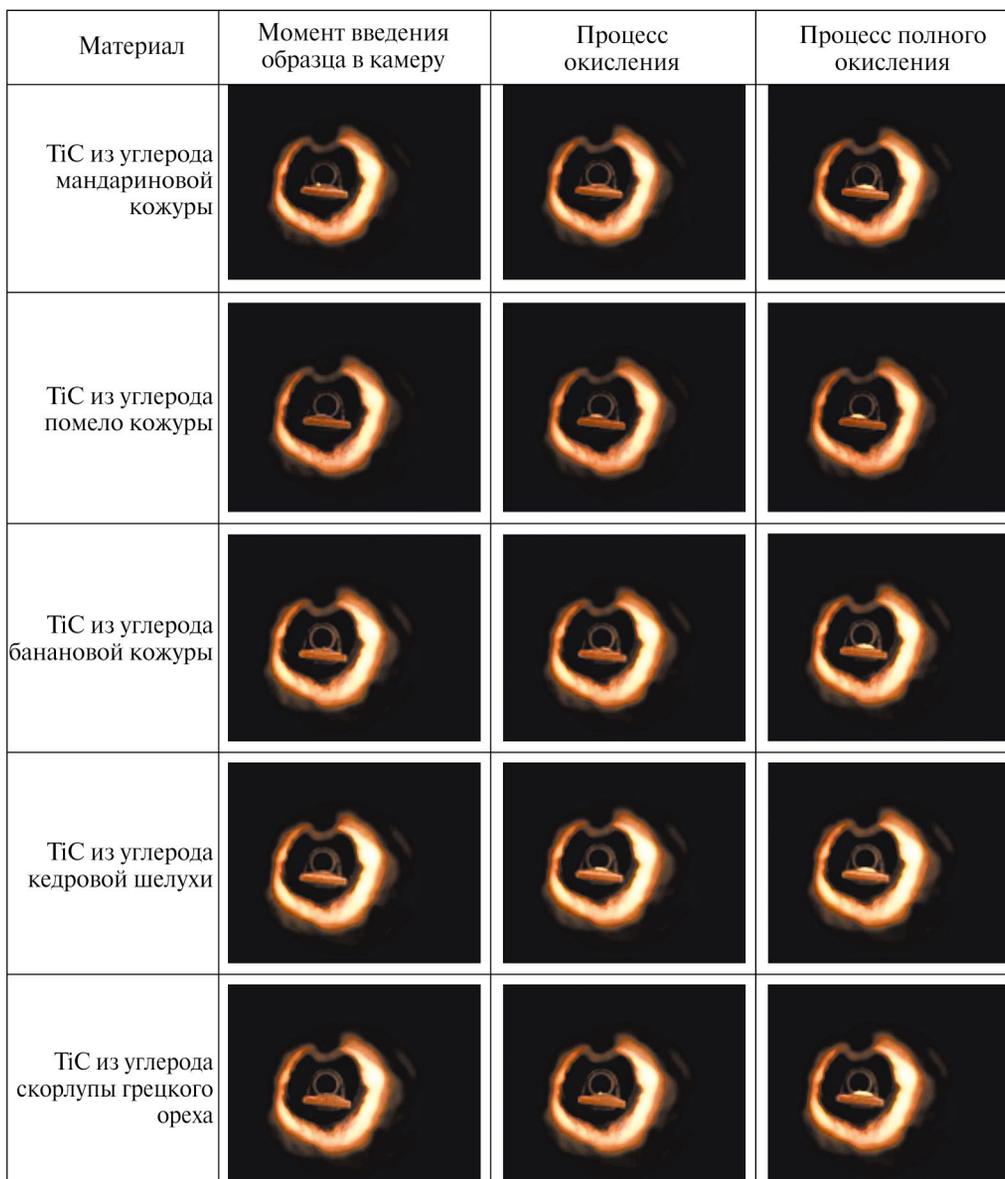
**Рис. 3.** Результаты рентгеновской дифрактометрии продуктов синтеза карбида титана.

С целью подтверждения формирования кубической фазы карбида титана был выполнен рентгенофазовый анализ исследуемых образцов.

На рис. 3 приведены результаты рентгеновской дифрактометрии.

По данным количественного рентгенофазового анализа во всех продуктах синтеза главной фазой идентифицируется кубическая фаза карбида титана с кубической решеткой типа NaCl и параметром решетки  $a = 0.432$  нм. По дифрактограмме наблюдается тенденция к повторяемости эксперимента и отсутствие примесных фаз.

Далее выполнены исследования процессов термического окисления в экспериментальной установке с установлением времени начала окисления навесок карбида титана, полученного с использованием различного биоуглеродного сырья методом плазменной дуговой инициации. Исследование выполнялось в несколько этапов: в терморегулируемой печи задавалась необходимая температура нагрева (от 600 до 800°C), отклонения температуры воздуха в ней не превышало  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Навеска с порошком карбида титана помещалась на держатель с координатным механизмом, ход которого калибровался по заданным координатам относительно центра печи. Видеофиксация процессов начала окисления до полного свечения всей навески с порошком карбида титана для каждого исследуемого материала выполнялась одновременно с началом движения держателя. Временем на-



**Рис. 4.** Типичные изображения высокоскоростной видеосъемки процесса окисления и горения исследуемых образцов карбидов титана.

чала окисления порошка карбида титана считалось время от момента входа навески в фокус камеры до появления на поверхности гранулы свечения, соответствующего началу процесса термического разложения.

Типичные кадры высокоскоростной видеосъемки процесса окисления порошков в широком диапазоне температур приведены на рис.4.

Результаты исследования процессов окисления при лучистом нагреве приведены в табл. 2. Анализ результатов экспериментальных исследований процессов окисления порошков исследуемых

образцов карбидов титана, полученного с применением различных видов биоуглерода в электродуговой плазме постоянного тока, показал, что с увеличением температуры воздействия на продукт синтеза до 1000°C в окислительной среде процесс начала окисления существенно интенсифицируется, например образец с углеродом из цедры мандарина в 3.7 раза, образец с углеродом из цедры помело в 6 раз, из банановой кожуры в 3.5 раза, с углеродом кедровой скорлупы 5.9 раз, с углеродом из скорлупы грецкого ореха в 5.5 раз. В результате наблюдается прирост массы остатка после его извлечения из печи. С увеличением температуры до 1200°C скорость окисления

**Таблица 2.** Результаты исследований процессов воспламенения и горения навесок карбида титана, полученного с применением различных видов биоуглерода

Образец	Температура, °С	Скорость окисления карбида титана, с	Масса до термического воздействия, мг	Масса после термического воздействия, мг	Увеличение массы окисленного образца, мг
TiC (углерод из цедры мандарина)	800	14.066	0.1006	0.1058	0.0052
	1000	3.825	0.0993	0.0998	0.0005
	1200	0.378	0.1084	0.1175	0.0091
TiC (углерод из цедры помело)	800	14.046	0.1017	0.1029	0.0012
	1000	2.329	0.1004	0.1013	0.0009
	1200	0.896	0.102	0.0857	-0.0163
TiC (углерод из кожуры банана)	800	14.252	0.1015	0.1141	0.0126
	1000	4.077	0.1006	0.105	0.0044
	1200	0.630	0.1006	0.0827	-0.0179
TiC (углерод из кедровой скорлупы)	800	17.29	0.1000	0.1011	0.0011
	1000	2.912	0.1026	0.1089	0.0063
	1200	0.434	0.1035	0.1023	-0.0012
TiC (углерод из скорлупы грецкого ореха)	800	18.276	0.1006	0.1025	0.0019
	1000	3.314	0.1001	0.1032	0.0031
	1200	0.280	0.1052	0.1023	-0.0029

продуктов синтеза увеличивается по сравнению с температурой в печи, равной 1000°C, более чем в 6 раз для материалов, полученных с углеродом из кедровой скорлупы и банановой кожуры, более чем в 10 раз для материалов с углеродом из цедры мандарина и скорлупы грецкого ореха, а для материала, полученного с применением углерода из цедры помело, скорость воспламенения увеличилась всего в 2.6 раза. Также из аналитических данных, приведенных в табл. 2, видно, что с увеличением температуры в печи более 1000°C наблюдается незначительное снижение массы окисленного остатка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований по получению карбида титана с применением биоуглерода, полученного из лигноцеллюлозной биомассы, безвакуумным электродуговым методом показали, что окисление данных карбидов осуществляется с существенным увеличением массы образцов, что говорит об их высокой термостойкости. Установлено, что максимальный прирост в массе показал образец карбида титана, полученный с применением биоуглерода из цедры помело и кожуры банана, среднее увеличение массы показал образец с углеродом из цедры мандарина, минимальные значения показали материалы с использованием биоуглерода из скорлупы кедровых и грецких орехов. При помещении полученных продуктов синтеза в высо-

котемпературную среду процесс окисления протекает существенно быстрее при температурах более 1000°C с увеличением массы окисленного остатка. При повышении температуры более 1200°C скорость окисления увеличивается, но прирост массы не наблюдается (исключая образец карбида титана, полученного с применением биоуглерода из цедры мандарина).

Технология получения ультратугоплавких материалов на основе карбида титана безвакуумным электродуговым методом позволяет использовать в качестве источника углерода лигноцеллюлозную биомассу, подверженную термической конверсии. Полученные продукты синтеза имеют высокую термическую стойкость до 1000°C. Полученные результаты исследования подтверждают высокоэффективный способ утилизации отходов пищевой промышленности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках программы развития Томского политехнического университета (модернизация систем регистрации электрических параметров электродугового лабораторного стенда).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ 21-79-10030.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gusev A.I. // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 71. № 6. P. 439–463.  
<https://doi.org/10.1070/rc2002v071n06abeh000721>
2. Syamsai R., Kollu P., Kwan Jeong S., and Nirmala Grace A. // Ceram. Int. 2017. V. 43. № 16. P. 13119–13126.  
<https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.07.003>
3. Luo Y., Yang C., Tian Y. et al. // J. Power Sources. 2020. V. 450. P. 227694.  
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2019.227694>
4. Dong Q., Huang M., Guo C., Yu G., and Wu M. // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 5. P. 3206–3214.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.09.217>
5. Ghidui M., Lukatskaya M.R., Zhao M.-Q., Gogotsi Y., and Barsoum M.W. // Nature. 2014. V. 516.  
<https://doi.org/10.1038/nature13970>
6. Lin S.Y. and Zhang X. // J. Power Sources. 2015. V. 294. P. 354–359.  
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2015.06.082>
7. Ghosh S., Ranjan P., Kumaar A., Sarathi R., and Ramaprabhu S. // J Alloys Compd. 2019, vol. 794, p. 645–653.  
<https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.04.299>
8. Kunkel C., Viñ F., Ramírez P.J., Rodriguez J.A., and Illas F. // J. Phys. Chem. 2018. V. 123. P. 7567–7576.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b12227>
9. Amutio M., Lopez G., Aguado R., Bilbao J., and Ollazar M. // Energy and Fuels. 2012. V. 26. № 2. P. 1353–1362. <https://doi.org/10.1021/EF201662X>
10. Zhang Z., Li Yi., Luo L., et al. // Renew Energy. 2023. V. 202. P. 154–171.  
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.11.072>
11. Vuppaladadiyam A., Vuppaladadiyam S., Awasthi A. et al. // Bioresour Technol. 2022. V. 364.  
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128087>
12. Blesa M.J., Miranda J.L., Moliner R., et al. // J. Anal. Appl. Pyrol. 2003. V. 70. № 2. P. 665–677.  
[https://doi.org/10.1016/s0165-2370\(03\)00047-0](https://doi.org/10.1016/s0165-2370(03)00047-0)
13. Hilaluddin S., Mondal Sh. Rakhshit et al. // Bioresour Technol. 2023. V. 376.  
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2023.128910>
14. Tintner J., Preimesberger Ch., Pfeifer Ch. et al. // Ind. Eng. Chem. Res. 2018. V. 57. № 46. P. 15613–15619.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04094>
15. Zhang L., Li S., Li K., and Zhu X. // Energy Convers Manag. 2018, V. 166. P. 260–267.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.04.002>
16. Singh S. and Srivastava S. // Procedia Comput. Sci. 2020. V. 173. P. 272–280.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2020.06.032>
17. Cheng J., Hu S.C., Sun G.T., Geng Z.C., and Zhu M.Q. // Ind. Crops Prod. 2021. V. 170. P. 113690.  
<https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.113690>
18. Adelawon B.O., Latinwo G.K., Eboibi B.E., Agbede O.O., and Agarry S.E. // Chem. Eng. Comm. 2021. V. 209, № 9. P. 1246–1276.  
<https://doi.org/10.1080/00986445.2021.1957851>
19. Yu S., Wang L., Li Q., Zhang Y., and Zhou H. // Materials Today Sustainability. 2022. V. 19. P. 100209.  
<https://doi.org/10.1016/J.MTSUST.2022.100209>
20. Wang S., Dai G., Yang H., and Luo Z. // Prog. Energy Combust. Sci. 2017. V. 62. P. 33–86.  
<https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.05.004>
21. Demirbaş A. and Arin G. // Energy Sources. 2010. V. 24. № 5. P. 471–482.  
<https://doi.org/10.1080/00908310252889979>
22. Cao Z., Hu Sh., Yu J., et al. // J. Environ. Chem. Eng. 2022. V. 10. № 5.  
<https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108245>
23. Sheldon R.A. // Green Chemistry. 2014. V. 16. № 3. P. 950–963. <https://doi.org/10.1039/C3GC41935E>
24. Rosas J.M., Berenguer R., Valero-Romero M.J., Rodriguez-Mirasol J., Cordero T. // Front Mater. 2014. V. 1.  
<https://doi.org/10.3389/fmats.2014.00029>
25. Rasaki S.A., Zhang B., Anbalgam K., Thomas T., and Yang M. // Progress in Solid State Chemistry. 2018. V. 50. P. 1–15.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROGSOLIDSTCHEM.2018.05.001>
26. Cho D., Hoon Park J., Jeong Y., and Lak Joo Y. // Ceram Int. 2015. V. 41. № 9. P. 10974–10979.  
<https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2015.05.041>
27. De Bonis A., Santagata A., Galasso A., Laurita A., and Teghil R. // J. Colloid Interface Sci. 2017. V. 489. P. 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.08.078>
28. Li J., Ye J. // Int. J. Refract Met. Hard. Mater. 2023. V. 115. № 106215.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106215>
29. Zhang C., Loganathan A., Boesl B., Agarwal A. // Coatings. 2017. V. 7.  
<https://doi.org/10.3390/coatings7080111>

## Electric Arc Synthesis of Titanium Carbide Using Carbon Obtained from Thermal Conversion of Waste from the Power Industry

A. A. Svinukhova<sup>1,\*</sup>, S. A. Yankovsky<sup>1,\*\*</sup>, A. D. Misyukova<sup>1,\*\*\*</sup>, A. Ya. Pak<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

*\*e-mail: aag109@tpu.ru*

*\*\*e-mail: jankovsky@tpu.ru*

*\*\*\*e-mail: adm14@tpu.ru*

*\*\*\*\*e-mail: ayapak@tpu.ru*

The work presents for the first time the results of obtaining titanium carbide using a vacuum-free electric arc method using various types of biocarbon obtained by classical pyrolysis of biomass waste, such as tangerine peel, pomelo peel, banana peel, pine nut shells, walnut shells. Analysis of X-ray diffraction patterns of the synthesized materials showed the repeatability of the experiment with the receipt of diffraction maxima indicating the formation of a cubic structure of titanium carbide. An analysis of the thermal oxidation of the resulting powders showed that up to a thousand degrees the process proceeds quite slowly, but with increasing temperature the oxidation rate increases significantly. It has been established that during thermal heating in an oxidizing environment, the mass of the studied titanium carbide powders obtained using various types of carbon increases, which is confirmed by thermogravimetric analysis.

Keywords: *titanium carbide, biocarbon, X-ray diffraction pattern, pyrolysis, biomass*