



DOI 10.8562/JEST.214.16
УДК 621.921.26

А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА ПРИ СИНТЕЗЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

A.E. Anikin, G.V. Galevsky, V.V. Rudneva

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGY BASICS OF USING OF LIGNITE CHAR IN THE SYNTHESIS OF SILICON CARBIDE

Исследована термодинамика и определены оптимальные температурно-временные режимы карбидизации брикетированной шихты «микрокремнезем — бурогольный полукокс». В системах Si—O—C и Si—O—C—H процесс карбидообразования является доминирующим: при стехиометрическом составе шихты максимальное содержание в продуктах восстановления карбида кремния достигается при 1700 К. Полная карбидизация шихты в условиях термической обработки достигается при температуре 1923—1973 К при длительности 20—15 минут. Установлены технологическая целесообразность, условия и показатели химического обогащения продуктов карбидизации. Исследованы фазовый, химический, гранулометрический составы и морфология частиц карбида кремния. Выявлено, что при карбидизации образуется карбид кубической структуры (β -SiC). Содержание карбида после обогащения составляет более 90 %. Карбид кремния получен в виде микропорошка с удельной поверхностью 8000—9000 м²/кг из имеющих неправильную форму частиц размерным диапазоном 0,2—1,0 мкм.

КАРБИД КРЕМНИЯ; МИКРОКРЕМНЕЗЕМ; БУРОУГОЛЬНЫЙ ПОЛУКОКС; ХИМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ; МИКРОПОРОШОК.

Thermodynamics is investigated and the optimal temperature-time regimes of carbidization of the briquetted charge microsilica — lignite char are defined. In Si — O — C and Si — O — C — H systems carbide formation is the dominant process, when the stoichiometric composition of the charge the maximum content in the products of recovery of silicon carbide is achieved at 1700 K. The full carbonization of charge in conditions of heat treatment is reached at temperature of 1923 — 1973 K with duration of 20 — 15 minutes. Technological expediency, conditions and rates of chemical enrichment of carbidization products are established. The phase, chemical, granulometric compositions and morphology of silicon carbide particles are investigated. Revealed is that the carbide of the cubic structure (β -SiC) is formed during carbonization. The carbide content after enrichment is over 90 %. The silicon carbide is obtained in the form of micropowder with a specific surface area 8000 — 9000 m²/kg, the particle size range of 0.2 — 1.0 micron, having an irregular shape.

SILICON CARBIDE, SILICA FUME, LIGNITE CHAR, CHEMICAL ENRICHMENT, MICROPOWDER.

Введение

Производство карбида кремния — одно из важнейших в структуре современной металлургии — составляет около 800 тыс. т в год. Крупнейшие сферы использования карбида кремния — это металлургия (около 45 % мирового спроса), производство абразивов (до 30 %) и огнеупоров (до 25 %). Специфика термомеханических, электрофизических, физико-химических свойств

карбида кремния предопределяет следующие направления его традиционного и перспективного применения: материалы на связках; керамика конструкционная и функциональная; композиционные материалы и покрытия; поверхностное и объемное модифицирование материалов.

Современное производство карбида кремния почти полностью основано на углеродотермическом способе Ачесона. По этому способу полу-

чение карбида кремния представляет собой периодический блок-процесс в электропечах сопротивления мощностью 4,5–5,5 МВА при температуре 2500–2900 К. Полученный карбид кремния — это кристаллы, сросшиеся в так называемые друзы (куски), которые после разборки электропечи подвергаются дроблению, обогащению и расसेву по фракциям. Товарной продукцией абразивных заводов является зерно карбида различной крупности: шлифзерно (размер 2500–160 мкм), шлифпорошки (160–28 мкм), микропорошки (63–10 мкм), тонкие микропорошки (10–1 мкм). В настоящее время выпускают три вида карбида кремния: черный, зеленый и электротехнический.

В течение достаточно длительного времени потребности в карбиде кремния металлургии, огнеупорного и керамического производств удовлетворялись за счет шлифматериалов абразивного назначения, что неоправданно повышало стоимость огнеупоров и керамики, а в металлургии в отдельных случаях делало применение карбида кремния технологически и экономически нецелесообразным. Ситуация усугублялась постоянным ростом цен на электроэнергию и ужесточением требований национальных экологических законодательств. В связи с этим главные производители карбида кремния — компании «Saint-Gobian» (Франция), «Exolon — ESK» (США — ФРГ), «Carborundum Co» (США), «H. Starck Co» (ФРГ) и др. — в 80-е годы разработали и освоили технологические процессы производства так называемого безразмольного карбида кремния, получаемого как правило из высокодисперсных шихт печным синтезом в виде микропорошков с последующим их химическим обогащением. Исследования в этом направлении проводились и в нашей стране и завершились положительными научно-прикладными результатами: снижением температуры синтеза с 2500–2900 до 1900 К, (т. е. на 600–1000°), продолжительности синтеза с 26–29 до 1 часа, расхода электроэнергии в 2–4 раза; достижением содержания карбида кремния в продуктах синтеза до 90,0 % мас.; получением карбида кремния в виде микропорошков крупностью 1–5 мкм; возможностью использования для производства карбида кремния забалансового и техногенного сырья, например низкокачественных песков, шунгитных пород, микрокрем-

незема, коксовых пылей и мелочи, полукоксов; возможностью реализации производства карбида кремния в непрерывном режиме, например с использованием туннельных, трубчатых вращающихся, шахтных печей. В связи с этим было принято решение о внедрении разработок на ряде предприятий Минстанкопрома. Однако социально-экономические изменения в стране на рубеже 80–90-х годов не позволили реализовать намеченные планы.

Следовательно, научное и технологическое обоснование и реализация производства отечественного безразмольного карбида кремния остается задачей, имеющей важное прикладное значение. Целью настоящей работы было изучение процессов карбидизации техногенного микрокремнезема полукоксом из бурых углей Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна, технологические свойства которого исследовались авторами ранее и подробно описаны в работах [1, 2]. Технологическая и экономическая целесообразность применения полукоксов в качестве углеродных восстановителей подтверждена в работах [3–6].

Термодинамическое моделирование процессов карбидообразования в системах Si–O–C, Si–O–C–H

Термодинамическое моделирование проведено с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида кремния (соотношение компонентов, температура и давление в системе), определения равновесных показателей процесса (степень превращения сырья в карбид, состав газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования отдельных реакций, обеспечивающих в исследуемых условиях эффективную переработку сырья. В связи с использованием в процессе в качестве восстановителя и карбидизатора буроугольного полукокса с содержанием летучих до 10 % объектами исследования стали системы Si–O–C, Si–O–C–H.

Расчет равновесных составов систем Si–O–C и Si–O–C–H проводился «константным» методом. Расчеты выполнялись с использованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA» (ИХТТИМ СО РАН), имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодей-

ствия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридо-образующих систем. При расчетах рассматривалась область температур 800–2000 К при различном давлении в системе: от 0,1 до 0,0001 МПа. Расчеты проводились с шагом в 100°. Исходными данными служили константы равновесия реакций образования соединений из элементов. При проведении расчетов учитывалась возможность образования следующих компонент: в газовой фазе Si^+ , Si^- , Si_2 , Si_3 , O , O_2 , C , C^+ , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , SiO , SiC , SiC_2 , Si_3C , CO , CO_2 в системе Si-O-C ; Si , Si^+ , Si^- , Si_2 , Si_3 , O , O_2 , C , C^+ , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , H , H^+ , H_2 , CH_2 , CH_3 , CH_4 , C_2H , C_3H , C_4H , C_2H_2 , C_2H_4 , SiO , SiC , SiC_2 , Si_3C , CO , CO_2 в системе Si-O-C-H ; Si , SiO_2 , C , SiC в конденсированной фазе в обеих системах. Выбор в исследуемых системах соотношений исходных компонентов определялся стехиометрией реакции образования карбида кремния и составом шихтовых материалов. Плодотворность такого подхода при исследовании процессов карбидообразования подтверждена ранее в работах [7, 8].

Результаты расчетов равновесных составов систем Si-O-C и Si-O-C-H для общего давления 0,1 МПа приведены на рис. 1 и 2, а для давления 0,01 и 0,0001 МПа – в табл. 1 и 2.

Можно видеть, что в обеих системах процесс карбидообразования является доминирующим:



При стехиометрическом составе шихты максимальное содержание в продуктах карбида кремния достигается при 1700 К, а при 10 %-м недостатке углерода – при 1900 К. Введение в систему водорода фактически не влияет на процесс карбидообразования, что обусловлено крайне низким (менее 0,001 моль) содержанием в температурной области карбидообразования углеводородов и углеводородных радикалов. В системе Si-O-C равновесная степень превращения кремния в карбид не превышает 0,97 %, что соответствует содержанию монооксида кремния в газовой фазе 0,02 моль. Вследствие этого из шихты стехиометрического состава ($\text{SiO}_2 + 3\text{C}$) получить однофазный, не содержащий свободный углерод, карбид кремния невозможно (табл. 2). Этого можно избежать при использовании шихты с некоторым (~ 10 %) недостатком углерода - восстановителя (табл. 2). В этом случае в системе появляется область сосуществования карбида кремния и избыточного кремнезема. При этом температурная область сосуществования этих фаз тем шире, чем выше давление в системе. Выше этих температур карбид кремния сам является восстановителем для кремнезема, т. е. становится возможным следующее взаимодействие:

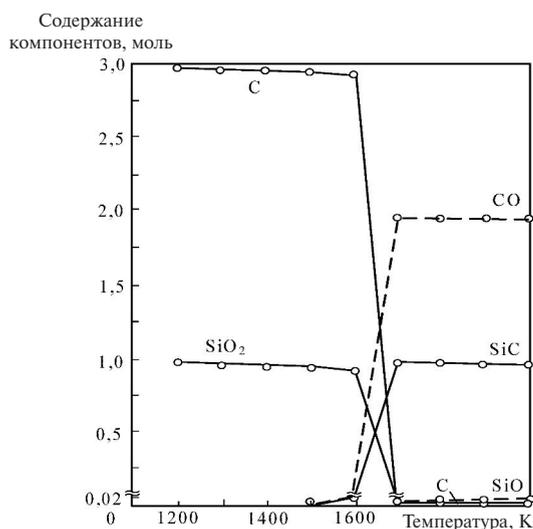


Рис. 1. Зависимость равновесного состава системы Si-O-C от температуры при соотношении $\text{Si:O:C} = 1:2:3$ и давлении $P = 0,1$ МПа (— — конденсированные, — — — газообразные продукты)

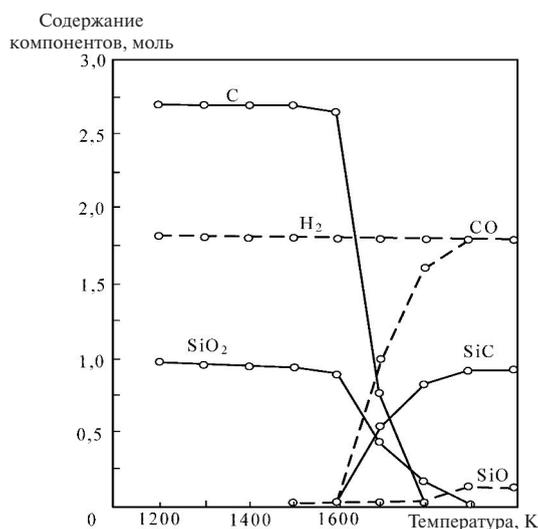


Рис. 2. Зависимость равновесных составов системы Si-O-C-H от температуры при соотношении $\text{Si:O:C:H} = 1:2:2,7:3,6$ и давлении $P = 0,1$ МПа (— — конденсированные, — — — газообразные продукты)

Таблица 1

Равновесные концентрации конденсированных продуктов взаимодействия в системе Si–O–C при соотношении компонентов Si:O:C = 1:2:3

T, К	Концентрации продуктов взаимодействия при двух значениях давления, %					
	P = 0,01 МПа			P = 0,0001 МПа		
	SiO ₂	C	SiC	SiO ₂	C	SiC
800	62,5	37,5	0	62,5	37,5	0
900	62,5	37,5	0	62,5	37,5	0,02
1000	62,5	37,5	0,01	62,2	37,3	0,52
1100	62,4	37,4	0,2	0	0,3	99,71
1200	61,0	36,7	2,3	0	0,4	99,60
1300	0	0,2	99,8	0	0,6	99,40
1400	0	0,2	99,8	0	1,0	99,0
1500	0	0,3	99,7	0	1,3	98,7
1600	0	0,4	99,6	0	2,0	98,0
1700	0	0,6	99,4	0	2,8	97,2
1800	0	0,9	99,1	0	3,7	96,3

Таблица 2

Равновесные концентрации конденсированных продуктов взаимодействия в системе Si–O–C–H при соотношении компонентов Si:O:C:H = 1:2:2,7:3,6

T, К	Концентрации продуктов взаимодействия при двух значениях давления, %					
	P = 0,01 МПа			P = 0,0001 МПа		
	SiO ₂	C	SiC	SiO ₂	C	SiC
900	64,94	35,06	0	64,94	35,06	0
1000	64,94	35,06	0	64,94	35,06	0,001
1100	64,94	35,06	0,002	64,84	35,00	0,16
1200	64,74	36,04	0,04	62,54	33,86	3,60
1300	64,54	35,94	0,30	12,47	0	87,53
1400	62,84	34,53	2,63	8,95	0	91,05
1500	51,27	26,61	22,12	0	0	100,00
1600	11,35	0	88,65	0	0	100,00
1700	0	0	100,00	0	0	100,00
1800	0	0	100,00	0	0	100,00
1900	0	0	100,00	0	0	100,00



В результате этой реакции карбид кремния очищается от избытка кремнезема. Особенно эффективным может быть проведение ее в вакууме.

Методика исследования карбидизации микрокремнезема

Исследование карбидизации микрокремнезема проводилось дискретным методом, включающим термическую обработку брикетированной шихты при заданных температурах и длительности и закалку продуктов карбидизации с последующим их химическим анализом.

При проведении исследований использовались микрокремнеземы, образующиеся при производстве кремния (МК-Кр) и высококремнистого ферросилиция (МК-ФС), содержащие соответственно 93,92 и 93,00 % мас. диоксида кремния, с удельной поверхностью 25000 м²/кг, а также полукокс из бурого угля (БПК) Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна с удельной поверхностью 264000 м²/кг, содержащий, %: углерод — 81,9; летучие — 9,5; золы — 8,6. Во всех случаях использовались шихты стехиометрического для получения карбида состава.

Исследование температурно-временных условий карбидизации брикетированных моношихт «микрокремнезем (МК-Кр, МК-ФС) — БПК» проводилось при температурах 1883, 1923, 1973 К при длительности термической обработки 5, 10, 15, 20, 25, 30 мин.

Термическая обработка шихт проводилась в электропечи сопротивления с цилиндрическим графитовым нагревателем с внутреннем диаметром 0,075 м (печи Таммана). Контроль температуры в рабочем пространстве печи проводился с помощью вольфрам-рениевой термопары ВР 5/20. Цилиндрические брикеты массой около $2,5 \cdot 10^{-3}$ кг и наружным диаметром 0,015 м помещались в графитовые тигли. Три тигля одновременно устанавливались в рабочее пространство нагретой электропечи, нагревались в ней в течение 3–4 мин до заданной температуры, а затем выдерживались в ней в течение заданного периода времени — от 5 до 90 мин. По истечении заданного времени графитовые тигли извлекались из электропечи, устанавливались в корундовые стаканы, которые плотно

закрывались пробками и помещались на 10 мин в холодную воду для быстрого охлаждения продуктов карбидизации. Это позволяло предотвратить окисление продуктов карбидизации кислородом и влагой атмосферы. После охлаждения продукты карбидизации количественно, т. е. без потерь, извлекались из тиглей, взвешивались, помещались в платиновые емкости, заливались раствором смеси азотной кислоты концентрацией 7,5–12,5 М и фтористоводородной концентрацией 2,0–3 М, взятых в объемном отношении 1: (3–5), и кипятились в течение 2,5–3,0 часов. Обработка карбида кремния смесью азотной и фтористоводородной кислот обеспечивает удаление примесей алюминия, магния, кальция, железа, марганца, никеля, хрома, меди, натрия, калия, кремния и их оксидов и рекомендуется для порошков карбида кремния крупностью от 5 до 200 мкм. В присутствии азотной кислоты металлические примеси и их оксиды образуют растворимые нитратные комплексы, в то время как при обработке одной фтористоводородной кислотой могут образовываться нерастворимые фториды. После остывания нерастворимый остаток, представляющий собой карбид кремния с примесью свободного углерода, отфильтровывался на бумажном фильтре, промывался на фильтре дистиллированной водой и ацетоном, высушивался до постоянной массы и взвешивался. После этого нерастворенный остаток подвергался окислительному обжигу для рафинирования от свободного углерода при температуре 1073–1123 К в течение 1,5–2,0 час. По убыли массы рассчитывались содержания в продуктах карбидизации свободного углерода и карбида кремния. По среднему для трех тиглей содержанию карбида кремния рассчитывали его выход как отношение массы практически полученного карбида к теоретически возможной.

Экспериментальные исследования карбидизации шихт «микрокремнезем — буроугольный полукокс». Обсуждение результатов

Результаты исследований представлены на рис. 3 и 4.

В обоих случаях процесс карбидообразования начинается с первых минут, и уже к 5-й минуте выход карбида при температурах карбидизации

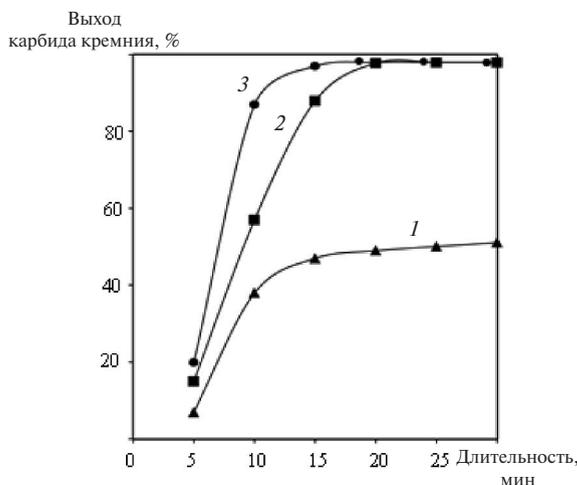


Рис. 3. Зависимости выхода карбида кремния от температуры и длительности термообработки для шихты микрокремнезем МК-ФС-БПК (1 – 1873 К; 2 – 1923 К; 3 – 1973 К)

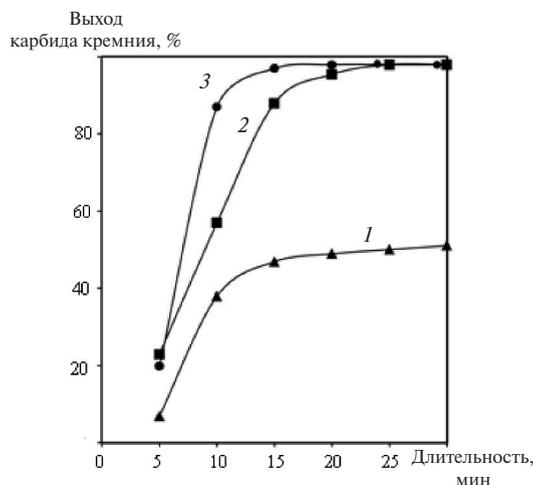


Рис. 4. Зависимости выхода карбида кремния от температуры и длительности термообработки для шихты микрокремнезем МК-Кр-БПК (1 – 1873 К; 2 – 1923 К; 3 – 1973 К)

1873, 1923, 1973 К составляет 5,23–7,21, 17,06–22,30, 20,20–23,51 %. Процесс карбидизации завершается при температуре 1973 К к 15-й минуте, 1923 К — к 20-й минуте. Содержание карбида в продуктах термической обработки шихт составляет 92,50 для МК-ФС и 94,90 % мас. для МК-Кр. Такие температурно-временные условия карбидообразования подтверждаются результатами исследования фазового состава продуктов термической обработки. Так, установлено, что в обоих случаях к 10-й минуте преобладающей фазой является карбид кремния кубической структуры (β -SiC), частично перестраивающийся при температурах 1923–1973 К и длительности термической обработки 50–90 мин в гексагональную (α -SiC_{II}). При карбидизации шихты «микрокремнезем МК-ФС-БПК» ему сопутствует α -железо. Во всех исследованных образцах также присутствует стекловидная фаза, образованная, по-видимому, силикатами кальция, магния и железа.

В результате химического обогащения содержание SiC в карбиде превышает 90 %, т.е. уровень, регламентированный для абразивных микропорошков зернистостью 1–2 мкм [9]. Эффективность обогащения от примесей оксидов и железа достаточно высока и составляет 87–95 %. Для карбида кремния характерно повышенное содержание кремнезема — более 7 %, что позволяет рассматривать его как перспективный матери-

ал для производства карбидокремниевых огнеупоров на кремнеземной связке, содержащих обычно, %, 84–89 SiC и 6–12 SiO₂ [10].

Оптимальные условия получения и обогащения карбида кремния и диапазон изменения его основных характеристик для серии из пяти параллельных опытов приведены в табл. 3. Можно видеть, что исследованные технологические варианты обеспечивают получение карбида кремния с воспроизводимыми фазовым, химическим и гранулометрическим составами и могут рассматриваться в качестве технологической основы для проектирования промышленного производства безразмольного карбида кремния из брикетированной высокодисперсной шихты «микрокремнезем — буроугольный полукокс».

Выводы

Проведены термодинамические и экспериментальные исследования процессов восстановительной переработки техногенного микрокремнезема на карбид кремния с применением буроугольного полукокса.

Установлено, что в обеих выбранных для термодинамического анализа системах Si—O—C и Si—O—C—H процесс карбидообразования является доминирующим. При стехиометрическом составе шихты максимальное содержание в продуктах восстановления карбида кремния достигается при 1700 К, а при 10 %-м недостатке угле-

Таблица 3

Оптимальные условия получения и обогащения карбида кремния и его характеристики

Условия получения и обогащения карбида кремния и его основные характеристики	SiC (МК–ФС+БПК)	SiC (МК–Кр + БПК)
Состав шихты, %: микрокремнезем (МК) буроугольный полукокс (БПК)	58,80 42,20	58,04 41,96
Удельная поверхность компонентов шихты, м ² /кг микрокремнезем буроугольный полукокс	20000–22000 255000–265000	
Температура карбидизации шихты, К	1923–1973	
Длительность карбидизации шихты, мин	25–20	
Химическое обогащение продуктов карбидизации концентрация раствора соляной кислоты, % соотношение Т:Ж температура, К длительность, час	35 1:2 383 3	
Фазовый состав	β-SiC	
Химический состав, %: SiC Al ₂ O ₃ CaO MgO Fe SiO ₂ С своб. Si своб.	90,42–90,86 0,10–0,25 0,32–0,53 0,12–0,18 0,08–0,12 7,32–7,94 0,41–0,54 0,13–0,17	90,94–91,18 0,10–0,15 0,37–0,49 0,03–0,10 0,05–0,11 6,97–7,13 0,63–0,81 0,23–0,27
Выход карбида кремния, %	96,84–97,12	97,31–97,63
Крупность и морфология частиц карбида кремния: удельная поверхность, м ² /кг размерный диапазон, мкм форма	8000–9000 0,2–1,0 неправильная	

рода — 1900 К. Второй состав шихты является технологически более предпочтительным, поскольку обеспечивает получение карбида, не содержащего примесей.

Проведена при температурах 1883, 1923, 1973 К и длительности 5–30 мин карбидизация брикетированных моношихт «микрокремнезем (МК-ФС и МК-Кр) — буроугольный полукокс». Определены оптимальные температурно-временные условия карбидизации: температура 1923–1973 К, длительность 20–15 минут.

Установлена целесообразность и определены оптимальные условия и показатели химического обогащения продуктов карбидизации: воздействие соляной кислотой концентрацией не менее 35 % при температуре 353 К, отношении Т:Ж = 1:2, длительности 3 часа; содержание карбида в продуктах обогащения свыше 90 %; удаление примесей оксидов и железа на 87–95 %.

Исследованы фазовый, химический, гранулометрический составы и морфология частиц карбида кремния в обоих технологических

вариантах получения. Выявлено, что при карбидизации образуется карбид кубической структуры (β -SiC), частично перестраивающийся при температурах 1923–1973 К и длительности термической обработки 50–90 мин в гексагональную (α -SiC_{II}). Содержание карбида после обогащения составляет 90,42–90,86%

при использовании микрокремнезема МК-ФС и 90,94–91,18 % при использовании микрокремнезема МК-Кр. В обоих случаях карбид кремния получен в виде микропорошка с удельной поверхностью 8000–9000 м²/кг из имеющих неправильную форму частиц размерным диапазоном 0,2–1,0 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аникин А.Е., Галевский Г.В.** Буроугольный полукокс Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна: производство, свойства, применение // Вестник Сибирского государственного промышленного университета. 2014. № 3. С. 52–59.
2. **Аникин А.Е., Галевский Г.В.** Производство, свойства и применение буроугольного полукокса Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна // Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество». Новокузнецк, 2014. С. 115–120.
3. **Рудыка В.И., Малина В.П.** Сталь, уголь, кокс — 2014 и перспектива (Аналитический обзор материалов саммита «Европейский кокс 2014») // Кокс и химия. 2014. № 7. С. 15–25.
4. **Романов С.М.** Перспективы развития добычи, переработки и использования бурых углей в России // Уголь. 2009. № 1. С. 15–17.
5. **Страхов В.М.** Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств // Кокс и химия.

2008. № 9. С. 44–49.

6. **Страхов В.М.** Проблемы с углеродными материалами для рудной и химической электротермии и пути их решения // Кокс и химия. 2010. № 8. С. 29–33.

7. **Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Ширяева Л.С., Терентьева М.А.** Синтез и эволюция дисперсности боридов и карбидов ванадия и хрома в условиях плазменного потока // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 12–17.

8. **Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Исследование плазменного синтеза нанокарбида хрома / СиБГИУ // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. трудов. Новокузнецк, 2012. № 29. С. 94–101.

9. **Гаршин А.П., Шумячер В.М., Пушкарев О.И.** Абразивы и материалы конструкционного назначения на основе карбида кремния. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2008. 189 с.

10. **Сорлье М., Ойя Х.А.** Катоды алюминиевого электролизера / Науч. ред. П.В. Поляков. Красноярск: Версо, 2013. 720 с.

REFERENCES

1. **Anikin A.Ye., Galevskiy G.V.** Burougolnyy polukoks Berezovskogo mestorozhdeniya Kansko-Achinskogo basseyna: proizvodstvo, svoystva, primeneniye. [Brown-coal semi-coke of Berezovsky field of the Kansk and Achinsk pool: production, properties, application]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*. 2014. № 3. S. 52–59. (rus.)
2. **Anikin A.Ye., Galevskiy G.V.** Proizvodstvo, svoystva i primeneniye burougolnogo polukoksa Berezovskogo mestorozhdeniya Kansko-Achinskogo basseyna. [Production, properties and use of brown-coal semi-coke of Berezovsky field of the Kansk and Achinsk pool]. *Trudy XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Metallurgiya: tekhnologii, upravleniye, innovatsii, kachestvo»*. Novokuznetsk, 2014. S. 115–120. (rus.)
3. **Rudyka V.I., Malina V.P.** Stal, ugol, koks — 2014 i perspektiva (Analiticheskiy obzor materialov sammita «Yevropeyskiy koks 2014»). [Steel, coal, coke — 2014 and prospect (The State-of-the-art review of materials of the

summit “The European coke 2014»)]. *Koks i khimiya*. 2014. № 7. S. 15–25. (rus.)

4. **Romanov S.M.** Perspektivy razvitiya dobychi, pererabotki i ispolzovaniya burykh ugley v Rossii. [Prospects of development of production, processing and use of brown coals in Russia]. *Ugol*. 2009. № 1. S. 15–17. (rus.)

5. **Strakhov V.M.** Nauchnyye i proizvodstvennyye aspekty polucheniya spetsialnykh vidov koksa dlya elektrotermicheskikh proizvodstv. [Scientific and production aspects of receiving special types of coke for electrothermal productions]. *Koks i khimiya*. 2008. № 9. S. 44–49. (rus.)

6. **Strakhov V.M.** Problemy s uglerodnymi materialami dlya rudnoy i khimicheskoy elektrotermii i puti ikh resheniya. [Problems with carbon materials for an ore and chemical electrothermie and a way of their decision]. *Koks i khimiya*. 2010. № 8. P. 29–33. (rus.)

7. **Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Shirayeva L.S., Terentyeva M.A.** Sintez i evolyutsiya dispersnosti boridov i karbidov vanadiya i khroma v usloviyakh plazmennogo



potoka. [Synthesis and evolution of dispersion of borid and carbides of vanadium and chrome in the conditions of a plasma stream]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2011. № 10. S. 12–17. (rus.)

8. **Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye plazmennogo sinteza nanokarbida khroma. [Research of plasma synthesis of nanocarbide of chrome] / SibGIU. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sektsii RAEN. Otdeleniye metallurgii : sb. nauch. trudov / Novokuznetsk*. 2012. № 29. S. 94–101. (rus.)

9. **Garshin A.P., Shumyacher V.M., Pushkarev O.I.** Abrazivy i materialy konstruksionnogo naznacheniya na osnove karbida kremniya. [Abrasives and materials of constructional appointment on the basis of silicon carbide]. Volgograd : Izd-vo VolgGASU, 2008. 189 s. (rus.)

10. **Sorlye M., Oyya Kh.A.** Katody alyuminiyevogo elektrolizera. [Cathodes of the aluminum electrolyzer] / Nauch. red. P.V. Polyakov. Krasnoyarsk : Verso, 2013. 720 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АНИКИН Александр Ефимович — старший преподаватель Сибирского государственного промышленного университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой Сибирского государственного промышленного университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

РУДНЕВА Виктория Владимировна — доктор технических наук профессор Сибирского государственного промышленного университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@mail.ru

AUTHORS

ANIKIN Aleksandr E. — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

GALEVSKY Gennadiy V. — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

RUDNEVA Victoria V. — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@mail.ru