

Figure 6: SEM image of lased shale showing fractures (Source: Graves and Bailo, 2005)



Figure 7: Penetrated limestone core exposed to 5,34 kW fiber laser (Source: Gahan and Batarseh, 2005)

Gahan and Batarseh (2005) showed that a hole with 50 mm diameter and 310 mm length was created when limestone core was exposed to 5.34 kW fiber laser.

#### REFERERANCE:

1. Bakhtbidar M., Ghorbankhani M., Alimohammadi M., Kazemi Esfeh M. R., & Rezaei P. (2011). Application of Laser Technology for Oil and Gas Wells Perforation, Society of Petroleum Engineers.
2. Batarseh S.I. (2001). Application of Laser Technology in the Oil and Gas Industry: An Analysis of High Power Laser-Rock Interaction and Its Effect on Altering Rock Properties and Behavior. PhD Dissertation, Colorado School of Mines.
3. Batarseh, S. I., Abass, H. H., Al-Mulhem, A. A., & Habib, N. S. (2012). High Power Laser Application in Openhole Multiple Fracturing with an Overview of Laser Research; Past, Present and Future, Society of Petroleum Engineers.
4. Behrmann, L. A. 1995. Under Balance Criteria for Minimum Perforation Damage. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Netherlands, 14-16 May 1995*.
5. Gahan, B.C., & Batarseh, S. (2005). Laser Drilling – Drilling with the Power of Light. DOE Annual Technical Progress Report. DOE Award Number: DEFC26-00NT40917.
6. Graves, R. M., & O'Brien D. G. (1999). StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in 21<sup>st</sup> Century, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, SPE 56625.

Scientific adviser: Ph.D in Oil and Gas sciences Ogulgerik Berdimyradowa, head of Development of oil and gas reservoirs department.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ

А.А. Лавренчук<sup>1</sup>, М.Ю. Сперанский<sup>2</sup>, П.В. Поваляев<sup>3</sup>

Томский политехнический университет,

<sup>1</sup>ИШЭ, ОЭЭ, 3-А9-26, <sup>2</sup>ИШЭ, ОЭЭ, 3-А9-42, <sup>3</sup>ИШИТР, ОАР, А1-48

В настоящее время внимание современной промышленности направлено на поиск и развитие новых методов переработки вольфрамсодержащих руд и органических отходов с целью получения востребованных материалов, например, карбида вольфрама. Поиск таких методов переработки обусловлен стремлением к снижению энергетических и временных затрат на процесс переработки и синтеза материалов.

Карбид вольфрама обладает уникальными характеристиками, а именно невосприимчивостью к окислению, пластичностью под высокими нагрузками, сохранением высокой твер-

дости при высоких температурах, а также данное соединение является низкотоксичным веществом и устойчиво ко многим видам кислот. Данное соединение является сырьевой основой для производства сверхтвердых элементов различных инструментов [1]. Порошки и покрытия на основе карбида вольфрама получают следующими методами: осаждением из газовой фазы [2], обработкой поверхностей высокоинтенсивными электронными и ионными пучками [3], механохимическим синтезом в шаровых мельницах [4], генерацией плазменных пучков [5–7] и карботермическим восстановлением в резистивных и дуговых печах (в вакууме или инертной среде) [8–10]. Для реализации выше перечисленных методов в качестве исходных компонентов используются чистый вольфрам или различные оксиды данного соединения, полученные из вольфрамовой руды.

Недостатками вышеуказанных способов синтеза материалов являются значительные энергетические, капитальные и операционные затраты, что вызвано использованием дорогостоящего оборудования для создания вакуума или обеспечения инертной среды в реакторной зоне. Также большое количество технологических операций, необходимых для получения конечного продукта в жизненном цикле вольфрамовой руды определяет высокую стоимость и необходимость использования множества типов различных единиц специального оборудования. Безвакуумный электродуговой метод позволяет снизить затраты на синтез материалов, что связано с его конструктивными преимуществами: отказ от дорогостоящего вакуумного оборудования ввиду особенности методики и возможностью синтеза материалов в атмосфере воздуха, а также быстротой протекающих процессов, позволяющих сократить время синтеза. Этот относительно новый метод требует проведения исследований в области повышения производительности, дальнейшего повышения энергоэффективности. В данной работе представлены результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований температурных режимов работы электродов разрядного контура плазменного реактора переменного тока.

Исследование по определению температурных режимов работы проводилось на лабораторном безвакуумном электродуговом реакторе переменного тока, который ранее был модернизирован [11]. Электродуговой плазменный реактор представляет собой реактор совмещенного типа с вертикальным расположением электродов. При конструкции реактора с вертикальным расположением электродов дуговой разряд инициируется непосредственно между первым графитовым электродом и обрабатываемым материалом, заложенным в полость второго электрода, что позволяет обеспечить необходимые температурные условия для синтеза большинства материалов на основе углерода (известно, что температура в месте инициации дугового разряда может достигать порядка 10000 °С [12]). Процесс синтеза происходит без использования инертной среды или дополнительного оборудования для создания вакуума, но при этом продукты синтеза не окисляются что связано с особенностями устройства и работой электродугового реактора [13].

Электродуговой плазменный реактор состоит из регулируемого силового источника питания переменного тока, выполненного на базе промышленного двухфазного сварочного трансформатора марки ТДМ 450, такой источник питания имеет рабочий выходной ток от 80 А до 450 А, напряжение питания 380 В и напряжение холостого хода 63 В. Исходные материалы помещаются на дно цилиндрического графитового тигля, устанавливаемого на массивную медную шину, к которой подводится питание одного из выводов источника тока, тем самым обеспечивается максимальная площадь контакта и устойчивое положение тигля. Ко второму выходу источника питания подключается латунный стяжной захват, в котором фиксируется второй электрод, выполненный из мелкозернистого плотного графита. Подача второго электрода в реакторную зону (полость тигля) происходит с помощью подвижного ручного привода, после соприкосновения электрода с тиглем, графитовый электрод отводится на определенное расстояние в результате чего происходит образование дугового разряда.

Основными параметрами процесса электродугового синтеза материалов являются вольтамперные характеристики и температура зоны реакции. Для определения значения силы тока использовались токовые клещи марки TD-3348, данный прибор позволяет регистрировать зна-

чения силы тока до 1000 А. Регистрация напряжения проводилась с использованием мультиметра UNI-T UT 58С. С помощью высокотемпературного пирометра DT-9862S производилось измерение температуры на внешней стенке графитового тигля.

Регулирование процесса переработки и синтеза материалов в электродуговых реакторах может осуществляться путем изменения параметров силы тока и времени воздействия дугового разряда на образец. В данной работе были произведены исследования по изменению времени воздействия электродугового разряда от 10 до 50 с и шагом в 10 секунд при постоянном значении тока  $155 \pm 5$  А, на пустой графитовый тигель с целью определения влияния времени воздействия дугового разряда на массовый баланс системы. В таблице 1 показаны основные параметры работы электродугового реактора и их влияние на массовый баланс компонентов разрядного контура реактора, полученные в результате серии экспериментов по изменению времени воздействия электродугового разряда. Количество выделившейся энергии рассчитано по электрической мощности и времени воздействия; в рассматриваемой системе выделяется от 65 до 325 кДж энергии за время до 50 секунд.

Таблица 1. Влияние параметров электродугового реактора переменного тока на температурные режимы и массовый баланс элементов системы

№ Эксп.	Время, сек	Ток, А	Напряжение, В	Количество энергии, кДж	Максимальная температура, °С	$\Delta m$ электрода, г	$\Delta m$ тигля, г
1	10	155	42	65	1190,3	-0,412	0,116
2	20	155	42	130	1227,7	-0,533	0,127
3	30	155	42	195	1260,0	-0,694	0,244
4	40	155	42	260	1371,9	-0,872	0,302
5	50	155	42	325	1545,6	-1,175	0,498

Исходя из данных полученных из серии экспериментов по изменению длительности воздействия электродугового разряда на графитовый тигель наблюдается изменение, а именно увеличение массы тигля и уменьшение массы второго электрода. Следует отметить, что увеличение времени воздействия разряда, при сохранении значения силы тока, приводит к увеличению температуры реакторной зоны, что отображено на рисунке 1. Изменение массы элементов системы можно объяснить высокими температурами при горении дугового разряда, в результате чего происходит разрушение элементов системы с отделением углерода. Выделившийся углерод оседает на стенках графитового тигля, что приводит к увеличению его массы, также углерод при окислении кислородом образуются газы СО и СО<sub>2</sub> что приводит к экранированию зоны реакции и предотвращает окисление синтезируемого продукта.

По данным измерений температуры (таблица 1, рисунок 1) видно, что максимальная температура была достигнута при максимальном времени воздействия дуги, данный факт можно связать с процессом нагрева тигля. Увеличение времени воздействия позволяет обеспечить наибольший прогрев графитового тигля, со стенки которого производилось измерение температуры, в результате чего при максимальном времени была достигнута наибольшая зарегистрированная температура, при меньших значениях времени наблюдаются температуры ниже максимальной, что связано с недостаточным нагревом графитового тигля.

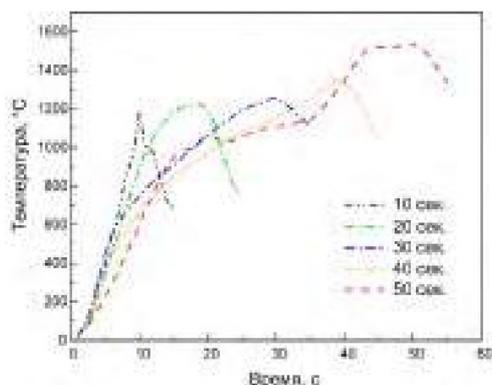


Рис. 1. Рост температуры поверхности тигля

Также в процессе экспериментов была достигнута температура тигля на внешней стенке в 1545 °С, что достаточно для синтеза карбида вольфрама безвакуумным электродуговым методом (температура синтеза карбида вольфрама 1200 °С [14]).

При исследовании режимов работы лабораторного атмосферного электродугового реактора переменного тока были получены основные параметры работы реактора и их влияние на массовый баланс системы. В процессе анализа температурных режимов работы была определена максимальная температура – 1545 °С, достигаемая при заданных параметрах системы, что позволяет утверждать о возможности синтеза карбида вольфрама на электродуговом реакторе переменного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Konyashin I., Klyachko L.I. History of cemented carbides in the Soviet Union // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier, 2015. Vol. 49, № 1. P. 9–26.
2. Dushik V. V., Rozhanskii N. V., Lifshits V.O., Rybkina T. V., Kuzmin V.P. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes // *Materials Letters*. Elsevier, 2018. Vol. 228. P. 164–167.
3. Remnev G.E., Uglov V. V., Shymanski V.I., Pavlov S.K., Kuleshov A.K. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam // *Applied Surface Science*. Elsevier, 2014. Vol. 310. P. 204–209.
4. Fernique R.M.T., Savoie S., Gariépy M., Braidy N., Schulz R. A simple route to produce tungsten carbide powders by high-energy ball milling and annealing // *Ceramics International*. Elsevier, 2020. Vol. 46, № 2. P. 1736–1742.
5. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z.Z. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2009. Vol. 481, № 1–2. P. 274–277.
6. Dash T., Nayak B.B. Tungsten carbide – Titanium carbide composite preparation by arc plasma melting and its characterization // *Ceramics International*. Elsevier, 2019. Vol. 45, № 4. P. 4771–4780.
7. Ланцев Е.А., Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Болдин М.С., Цветков Ю.В., Благовещенский Ю.В., Исаева Н.В., Андреев П.В., Сметанина К.Е. Исследование кинетики электроимпульсного плазменного спекания ультрамелкозернистых твердых сплавов WC-10% Co // *Физика и химия обработки материалов. Общество с ограниченной ответственностью Интерконтакт Наука*, 2019. № 6. P. 36.
8. Wang K.-F., Sun G.-D., Wu Y.-D., Zhang G.-H. Fabrication of ultrafine and high-purity tungsten carbide powders via a carbothermic reduction–carburization process // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier, 2019. Vol. 784. P. 362–369.
9. Красильников В.Н., Поляков Е.В., Хлебников Н.А., Кузнецов М.В., Таракина Н.В. Нанодисперсный карбид вольфрама (WC) и углеродсодержащие нанокompозиты (WC: NC): синтез, морфология, микроструктура // *Химия твердого тела и функциональные материалы–2016", XI семинар "Термодинамика и материаловедение"*. 2016. P. 184–186.
10. Пак А.Я., Якич Т.Ю., Кокорина А.И. Электродуговой синтез карбида вольфрама из рудных концентратов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального ...*, 2021. Vol. 332, № 5. P. 170–178.
11. Модернизация электродугового реактора для синтеза порошковых материалов для энергетики / Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А., Пак А.Я. // *Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии и материалы»*. - Севастополь: 2022. – С. 247-249.

12. Zhao J., Su Y., Yang Z., Wei L., Wang Y., Zhang Y. Arc synthesis of double-walled carbon nanotubes in low pressure air and their superior field emission properties // Carbon. Elsevier, 2013. Vol. 58. P. 92–98.
13. Pak A.Y., Shanenkov I.I., Mamontov G.Y., Kokorina A.I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Elsevier, 2020. Vol. 93. P. 105343.
14. Pervikov A. V., Krinitcyn M.G., Glazkova E.A., Rodkevich N.G., Lerner M.I. Synthesis of tungsten carbide from bimodal tungsten powder produced by electrical explosion of wire // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Elsevier, 2022. Vol. 103. P. 105733.

Работа выполнена в рамках программы Гос.задания ВУЗАм (FSWW-2022-0018).

Научный руководитель: к.т.н. А.Я. Пак, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

## КОНФИГУРИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

А.В. Клоков, А.С. Тутунин

Московский государственный технический университет  
Э, Э2, группа Э2-73Б

При проектировании автономных энергоустановок необходимо взвешенно принимать решение по выбору оптимальной конфигурации системы. Важность этого шага особенно проявляется при разработке автономных систем, требующих стабильного бесперебойного электроснабжения. Как правило, это достигается организацией энергосистемы, включающей в себя возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Причем, для достижения максимальной эффективности энергосистемы и решения проблемы с нестабильностью генерации ВИЭ, она должна включать в себя не только накопители энергии, но и являться гибридной. Системы, получающие энергию из единственного источника, зачастую не в состоянии удовлетворять потребность в бесперебойности энергоснабжения. Также, по сравнению с гибридными, они являются чрезмерно габаритными, что значительно увеличивает первоначальные затраты на оборудование.

В данной работе предлагаются принципы конфигурирования гибридной системы автономного энергоснабжения, состоящей из солнечной батареи (СБ), ветроэнергетической установки (ВЭУ) и аккумуляторной батареи (АБ) на основе метеорологических данных с временным разрешением в 4 часа, полученным из [1]. Математическая модель системы энергоснабжения основана на зависимостях мощности, вырабатываемой СБ и ВЭУ, от условий окружающей среды и энергии, запасаемой в АБ, от времени.

Мощность ( $W_{SP}$ , Вт), вырабатываемая СБ [2], зависит от плотности солнечного излучения, падающего по нормали к поверхности СБ, ( $I$ , Вт/м<sup>2</sup>) и температуры самой СБ ( $T_{SP}$ , °С):

$$W_{SP} = P_{SP} * \frac{I}{I_{ref}} * \left( 1 + K_T * (T_{ref} - T_{amb} - 0,0256 * I) \right), \quad (1)$$

где  $P_{сол}$  – установленная мощность СБ (Вт);  $I_{ref}$  – номинальная инсоляция на горизонтальную поверхность (1000 Вт/м<sup>2</sup>);  $T_{ref}$  – номинальная рабочая температура СБ (°С);  $K_T$  – температурный коэффициент (1/°С);  $T_{amb}$  – температура окружающей среды (°С).

Мощность ( $W_W$ , Вт), вырабатываемая ВЭУ, зависит от скорости ветра ( $V$ , м/с) и плотности набегающего потока воздуха ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>):