

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 721.763:661.666.22

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-5-544-551>

Поступило в редакцию 02.02.2022

Received 02.02.2022

Академик А. Ф. Ильющенко, О. А. Прохоров, Н. В. Кривуленко*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) используются для работы в экстремальных условиях благодаря их высокотемпературной эрозионной стойкости, абляционной стойкости и высоким механическим характеристикам при экстремально высоких температурах. Производство таких материалов включает несколько циклов газофазного или жидкофазного уплотнения пористого каркаса из углеродных волокон. Проанализированы основные параметры и технологические схемы уплотнения и их роль при изготовлении УУКМ. Предложены условия оптимизации технологических режимов и маршрутов многоциклового уплотнения для получения высокоплотных УУКМ при минимальном числе циклов. Разработан метод расчета изменений плотности и пористости в ходе многоциклового уплотнения УУКМ. Точность этого метода подтверждена экспериментальными данными.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, многоцикловое уплотнение, термоградиентное газофазное осаждение, жидкофазная пропитка/карбонизация под высоким давлением, плотность, пористость

Для цитирования. Ильющенко, А. Ф. Повышение эффективности уплотнения в технологиях изготовления высокоплотных углерод-углеродных композиционных материалов / А. Ф. Ильющенко, О. А. Прохоров, Н. В. Кривуленко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 5. – С. 544–551. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-5-544-551>

Academician Alexander F. Ilyushchenko, Oleg A. Prokhorov, Nikita V. Krivulenko*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INCREASING THE DENSIFICATION EFFICIENCY IN THE MANUFACTURING TECHNOLOGIES
OF HIGH-DENSITY CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS**

Abstract. Carbon-carbon composite materials (CCCM) are used in extreme environments due to their high-temperature erosion resistance, ablative resistance, and high mechanical performance at extremely high temperatures. The production of such materials includes several cycles of gas-phase or liquid-phase compaction of a porous reinforcement of carbon fibers. The article analyzes the main parameters and technological schemes of densification, and their role in manufacturing CCCM. Conditions of optimizing technological regimes and routes of multi-cycle densification for obtaining high-density CCCM with a minimum number of cycles are proposed. A method for calculating density and porosity changes during multi-cycle compaction of CCCM is developed. The accuracy of this method is confirmed by experimental data.

Keywords: carbon-carbon composite material, multi-cycle densification, thermal-gradient chemical vapour infiltration, liquid-phase high pressure impregnation/carbonization, density, porosity

For citation. Ilyushchenko A. F., Prokhorov O. A., Krivulenko N. V. Increasing the densification efficiency in the manufacturing technologies of high-density carbon-carbon composite materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 5, pp. 544–551 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-5-544-551>

Введение. Углерод-углеродные композитные материалы (УУКМ) благодаря эрозионной стойкости и высоким механическим характеристикам при экстремально высоких температурах широко применяются для работы в экстремальных условиях в ракетно-космической отрасли, судо-

строении, авиационной промышленности, автомобилестроении, строительстве, медицине и других отраслях промышленности. Высокоплотные УУКМ обладают крайне высокой себестоимостью и длительностью производственного цикла и из-за этого применяются обычно только при таких условиях эксплуатации, где другие материалы разрушаются вследствие воздействия высоких температур либо газо-абразивной эрозии. Весьма актуальной задачей, наряду с улучшением эксплуатационных характеристик таких материалов, является сокращение длительности и себестоимости их изготовления.

УУКМ содержат углеродные волокна, организованные в однонаправленные (1D), планарные (2D), или многомерные (3D, 4D и др.) армирующие структуры. Пространство между волокнами заполняется углеродной матрицей, защищающей их от внешних воздействий и обеспечивающей перераспределение механических нагрузок между отдельными волокнами. Пространство между волокнами заполняется углеродной матрицей, которая обеспечивает защиту волокон от внешних воздействий и перераспределение нагрузки между волокнами.

В настоящее время для заполнения каркаса из углеродных волокон углеродом применяются такие технологии, как химическая инфильтрация из газовой фазы (Chemical Vapour Infiltration, CVI), при которой матрица формируется за счет осаждения на волокнах пироуглерода, получаемого декомпозицией углеводородных газов, жидкофазная пропитка/карбонизация под высоким давлением (Liquid-Phase High Pressure Impregnation/Carbonization, LP HPIC), при которой между волокнами формируется матрица из кокса, полученного термическим разложением под давлением каменноугольного или нефтяного пеков, или комбинация указанных технологий. Композиционный материал с плотностью выше $1,5 \text{ г/см}^3$, пригодный для изготовления изделий высокой прочности, за один цикл уплотнения по жидкофазной технологии получить невозможно. Поэтому часто используют многоцикловую технологию уплотнения, при которой поры, оставшиеся в материале после очередного цикла уплотнения, повторно заполняются углеродом из жидкой или газовой фаз.

Оптимизация технологии многоциклового уплотнения УУКМ состоит из оптимизации технологических режимов и маршрутов уплотнения. Как оптимальные режимы, так и маршруты будут в значительной степени определяться характеристиками исходного сырья, особенностями используемого технологического оборудования, требуют проведения значительного объема экспериментальных исследований.

Для сложных схем нагружения и изделий, работающих в экстремальных условиях, предпочтительно использовать 4D или 3D УУКМ. Если изделие при эксплуатации подвергается воздействию высокотемпературной эрозии и высоким механическим нагрузкам, композиционный материал должен обладать минимальным уровнем пористости, и иметь графитированную матрицу.

Оптимизация технологических режимов должна проводиться с целью получения наиболее плотного заполнения пор материала на каждом из циклов уплотнения.

При многоцикловом уплотнении необходимо заполнить поры материала углеродом за минимальное количество циклов $N \rightarrow N_{\min}$. Вместе с тем по мере уплотнения в УУКМ увеличивается доля закрытых пор и поэтому в технологической цепочке должны быть предусмотрены операции, позволяющие обеспечить доступ прекурсоров углеродной матрицы к порам внутри материала для последующего уплотнения. Полученный композит должен содержать минимальное количество термически нестабильных компонентов.

Оптимизация процессов и технологических режимов. Особенности формирования пироуглеродной матрицы при использовании технологии CVI достаточно подробно рассмотрены в [1–5]. Для уплотнения заготовок толщиной более нескольких миллиметров наиболее эффективно использование метода подвижного фронта уплотнения (Thermal-Gradient Chemical Vapour Infiltration, TG-CVI), при котором разложение газообразного углеводородного прекурсора происходит в узкой области заготовки шириной w_d , перемещающейся от ее центра к периферии с заданной скоростью $\frac{dx}{d\tau}$. Область осаждения ограничена со стороны нагревателя условной границей, за которой поры становятся непроницаемы для газа-прекурсора, а с другой – минимальной температурой $T_{d\min}$, при которой начинается осаждение пироуглерода (рис. 1).

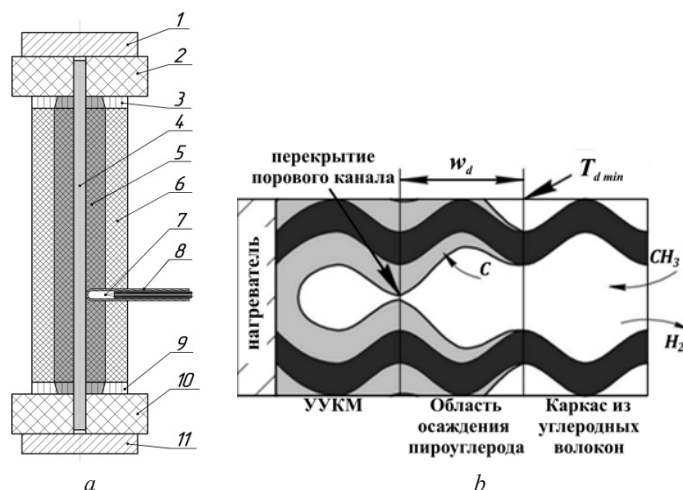


Рис. 1. Принципиальная схема [6] и модель газофазного уплотнения TG-CVI: 1, 11 – медные водоохлаждаемые токоподводы; 2, 10 – графитовые проставки; 3, 9 – углеродная ткань; 4 – молибденовый нагреватель; 5 – уплотненная область заготовки (УУКМ); 6 – неуплотненная заготовка (преформа); 7 – управляющая перемещаемая термопара; 8 – герметичный кварцевый капилляр

Fig. 1. Schematic diagram [6] and gas-phase compaction model TG-CVI: 1, 11 – copper water-cooled current supplies; 2, 10 – graphite spacers; 3, 9 – carbon fabric; 4 – molybdenum heater; 5 – compacted area of a blank (carbon-carbon composite materials); 6 – non-compacted blank (preform); 7 – controlling moving thermocouple; 8 – sealed quartz capillary

В данном случае эффективность уплотнения зависит от характеристик армирующих волокон и топологии порового пространства в армирующем каркасе, ширины, температуры и скорости перемещения зоны пиролиза, особенностей теплообмена, правильного управления газовыми потоками, а также от характеристик газообразного прекурсора (содержания в нем углерода и полноты протекания реакции его разложения на поверхности углеродного волокна).

Наличие на поверхности углеродных волокон посторонних примесей, аппретов, технологических связующих зачастую приводит к замедлению процесса осаждения пироуглерода в поровом пространстве армирующих каркасов. Поэтому перед уплотнением каркасы подвергают предварительной термической или электрохимической обработке для активирования поверхности углеродных волокон.

Эффективность уплотнения обычно увеличивается при уменьшении ширины и скорости перемещения зоны пиролиза, снижении давления P в камере установки. Увеличение температуры осаждения T приводит к осаждению в порах термически более стабильного пироуглерода.

Таким образом, для данного процесса условие оптимизации (достижение максимально возможной плотности ρ_{\max} и минимальной пористости θ_{\min}) может быть записано следующим образом:

$$\left\{ \frac{dx}{d\tau}, w_d, T, P \right\} \rightarrow (\rho_{\max}, \theta_{\min}).$$

Методом TG-CVI можно за один цикл уплотнить армирующий каркас с начальной плотностью 0,5–0,7 г/см³ до плотности на уровне 1,65–1,75 г/см³.

Применение технологии LP NPC отличается большой длительностью и для получения высокоплотного материала требуется не менее 5–6 циклов уплотнения общей длительностью более 10 недель. Каждый из циклов состоит из автоклавной пропитки каркаса или заготовки расплавом пека по схеме «вакуум/давление» с последующей карбонизацией матричного материала.

Использование вакуумирования заготовки с последующим созданием в камере автоклава высокого давления, оптимизация температуры и времени τ при жидкофазной пропитке каркаса из углеродных волокон или пористой заготовки позволяют добиться практически полного заполнения открытых пор материала расплавом пека. Открытая пористость θ_0 становится равной нулю, и для данного процесса условие оптимизации

$$\{P, T, \tau\} \rightarrow (\theta_o = 0).$$

При карбонизации пеков на величину коксового остатка K_o наряду с их химическим составом оказывают существенное влияние скорость нагрева $\frac{dT}{d\tau}$ в интервале температур 400–600 °С, давление и максимальная температура. При уменьшении скорости нагрева и увеличении давления K_o значительно возрастает. Увеличение максимальной температуры карбонизации, с одной стороны, снижает значение K_o , с другой – кокс, полученный при более высокой температуре, содержит меньшее количество неуглеродных составляющих, т. е. для эффективного уплотнения в процессе карбонизации необходимо добиться как можно большей величины коксового остатка, достижения близкой к максимально возможному значению $\rho_{кт}$ плотности кокса, уменьшения в нем закрытой пористости θ_3 :

$$\left\{P, T, \frac{dT}{d\tau}\right\} \rightarrow (K_o \rightarrow K_{o \max}, \rho_k \rightarrow \rho_{кт}, \theta_{кз} \rightarrow 0).$$

При этом в материале должны оставаться открытые поры ($\theta_o > 0$), доступные для дальнейшего уплотнения.

По мере заполнения пор материала углеродом с ростом числа циклов уплотнения увеличивается доля закрытых пор, недоступных для дальнейшей пропитки, что приводит к снижению конечной плотности материала. Кроме того, при эксплуатации изделия из УУКМ при температурах выше максимальной температуры термической обработки прочность будет снижаться за счет удаления в газовую фазу содержащихся в коксе и волокне неуглеродных компонентов, усадки материала матрицы при графитации, появления напряжений на границе раздела волокно/матрица. Поэтому должна быть проведена термостабилизация материала при максимально возможной температуре (обычно 2250–3000 °С). Такая операция называется графитацией.

В процессе графитации происходит очистка материала, графитация коксовой матрицы, вскрытие закрытых пор, релаксация напряжений на границе раздела волокно/матрица. Вместе с этим длительная выдержка при температурах свыше ~2200 °С приводит к потере части материала за счет сублимации. При этом немного снижается плотность углеродного волокна ρ_{fG} , а плотность кокса растет. Условие оптимизации в данном случае можно записать следующим образом:

$$\{T\} \rightarrow (\theta_{кз} = 0, \delta_{кG} \rightarrow \delta_{кG \min}),$$

где $\theta_{кз}$ – закрытая пористость графитированного кокса, а $\delta_{кG}$ – относительное уменьшение массы кокса в результате графитации.

Оптимизация маршрутов уплотнения. При использовании метода НР LPIC для получения УУКМ с высокой плотностью (свыше 1,8 г/см³) требуется проведение не менее, чем 5–6 циклов обработки. При этом проведение графитации после каждого цикла жидкофазного уплотнения будет способствовать повышению термической стабильности и конечной плотности материала. Кроме того, при графитации, наряду с положительными явлениями, происходит также потеря углеродного материала за счет сублимации. Поэтому при изготовлении УУКМ количество циклов графитации должно быть ограничено.

При использовании метода TG-CVI за один цикл уплотнения можно получить материал с плотностью, сравнимой с плотностью материала после 3–4 циклов уплотнения методом НР LPIC. Вместе с тем основная доля пор в таком материале закрыта, на поверхности может образовываться газоплотная пленка, препятствующая последующему доуплотнению материала. Для удаления такой пленки используют механическую обработку поверхности заготовок и высокотемпературную обработку, подобную графитации кокса. При этом, несмотря на то что пироуглерод и не склонен к переходу в графит, при высокотемпературной обработке (далее такую обработку будем называть графитацией) происходит его термическая стабилизация.

Несмотря на то что при графитации заготовок УУКМ, полученных методом TG-CVI, происходит открытие закрытых пор, повторное уплотнение методом TG-CVI зачастую неэффективно, так как структура порового пространства в таком материале затрудняет поступление газа-пре-

курсора и удаление водорода из областей, расположенных вдали от поверхности. Для дополнительного уплотнения такого материала более приемлема технология HP LPIC. Таким образом, при наличии соответствующего оборудования, наиболее эффективной является комбинированная технология уплотнения.

Условие оптимизации маршрута уплотнения в общем виде может быть записано как

$$\{\text{Маршрут уплотнения}\} \rightarrow (N \rightarrow N_{\min}, \rho \rightarrow \rho_{\max}, \theta \rightarrow \theta_{\min}).$$

Оценка изменения плотности и пористости УУКМ в процессе многоциклового уплотнения. В данном разделе на примере многоциклового уплотнения методом HP LPIC рассматривается возможность оценки плотности и пористости материала.

Для численной оценки изменения характеристик УУКМ в процессе уплотнения и графитации необходимо сделать несколько допущений:

объем образца изменяется незначительно $V = V_0$;

режимы пропитки под давлением образцов обеспечивают полное заполнение открытых пор пеком с плотностью $\rho_{\text{п}}$;

режимы карбонизации под давлением обеспечивают постоянное значение коксового остатка $K_o = \text{const}$;

кокс содержит определенную долю закрытых пор $-\theta_{\text{кз}}$;

объемная доля углеродного волокна при уплотнении и графитации не изменяется $U_f = \text{const}$;

в результате графитации весь кокс превращается в графит с плотностью ρ_G и все закрытые поры в материале вскрываются;

характеристики термически стабилизированного материала не изменяются при дальнейшей обработке.

Кажущаяся плотность заготовки после очередного цикла пропитка/карбонизация будет определяться начальной плотностью ρ_{i-1} , плотностью пека $\rho_{\text{п}}$, открытой пористостью θ_{oi-1} и коксовым остатком

$$\rho_i = \rho_{i-1} + \rho_{\text{п}} \theta_{oi-1} K_o.$$

Открытая пористость уменьшается за счет заполнения пор коксом с теоретической плотностью $\rho_{\text{кт}}$, имеющим закрытую пористость $\theta_{\text{кз}}$

$$\theta_{oi} = \theta_{oi-1} \left(1 - \frac{\rho_{\text{п}} K_o}{\rho_{\text{кт}} (1 - \theta_{\text{кз}})} \right).$$

Обе характеристики зависят от величины коксового остатка, которая может быть экспериментально определена по изменению массы образца ΔM в результате уплотнения с применением формулы

$$K_o = \frac{\Delta M}{\theta_{oi-1} \rho_{\text{п}}}.$$

Графитация при неизменном объеме углеродного волокна приводит к уменьшению его плотности ρ_{fG} (обычно на 3–6 %). Уменьшение плотности зависит от максимальной температуры термической обработки волокна при его производстве и тем ниже, чем выше последняя.

Плотность графитированного материала определяется по формуле

$$\rho_{iG} = U_f \rho_{fG} + U_{ki} (1 - \theta_{\text{кз}}) (1 - \delta_{\text{кG}}) \rho_{\text{кт}},$$

где объемная доля кокса, содержащего закрытые поры, перед графитацией

$$U_{ki} = 1 - U_f - \theta_{oi}.$$

Изменение открытой пористости при графитации связано с тремя явлениями: вскрытием закрытых пор

$$\Delta \theta_{\text{кoi}} = \theta_{\text{кз}} U_{ki};$$

уменьшением массы кокса за счет удаления неуглеродных компонентов и сублимации

$$\Delta\theta_{кМi} = \delta_{кG}U_{ки};$$

превращением кокса в графит с увеличением плотности

$$\Delta\theta_{кGi} = (1 - \delta_{кG}) \frac{\rho_{кт}(1 - \theta_{кз})}{\rho_G} U_{ки}.$$

Таким образом, открытая пористость образца после графитации будет определяться формулой

$$\theta_{iG} = \theta_{oi} + \Delta\theta_{кoi} + \Delta\theta_{кMi} + \Delta\theta_{кGi}.$$

При этом все поры будут открытыми и доступными для дальнейшей пропитки.

Указанные зависимости приемлемы также для оценки изменения плотности и пористости при доуплотнении методом НР LPIC заготовок УУКМ, полученных методом TG-CVI. Примеры маршрутов многоциклового уплотнения показаны на рис. 2.

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных. Оценку адекватности расчетных методов, приведенных в предыдущем разделе, проводили путем сравнения результатов расчета и эксперимента для образцов УУКМ, полученных способом НР LPIC.

Рассматривали шесть циклов пропитка/карбонизация. Расчеты значений кажущейся плотности и открытой пористости проводили для следующих маршрутов уплотнения: с графитацией после каждого цикла (6G1–6), с графитацией только после шестого цикла (6G6), с графитацией после первого и четвертого циклов (6G1,4) и с графитацией после второго и пятого циклов уплотнения (6G2,5).

Для проверки метода расчета уплотнения по маршрутам 6G1,4 и 6G2,5 были изготовлены экспериментальные образцы УУКМ. В этих образцах использовали армирование стержнями из углеродного волокна по схеме 4D-L. Такие каркасы характеризовались наличием двух типов пор, которые значительно отличаются по размерам: поры микронного размера между отдельными углеродными волокнами в стержнях, и крупные полости размером в сотни микрометров между армирующими стержнями. Измерение кажущейся плотности и открытой пористости проводили после каждого цикла уплотнения, начиная со второго. Фотография одного из таких образцов и его микроструктура изображены на рис. 3.

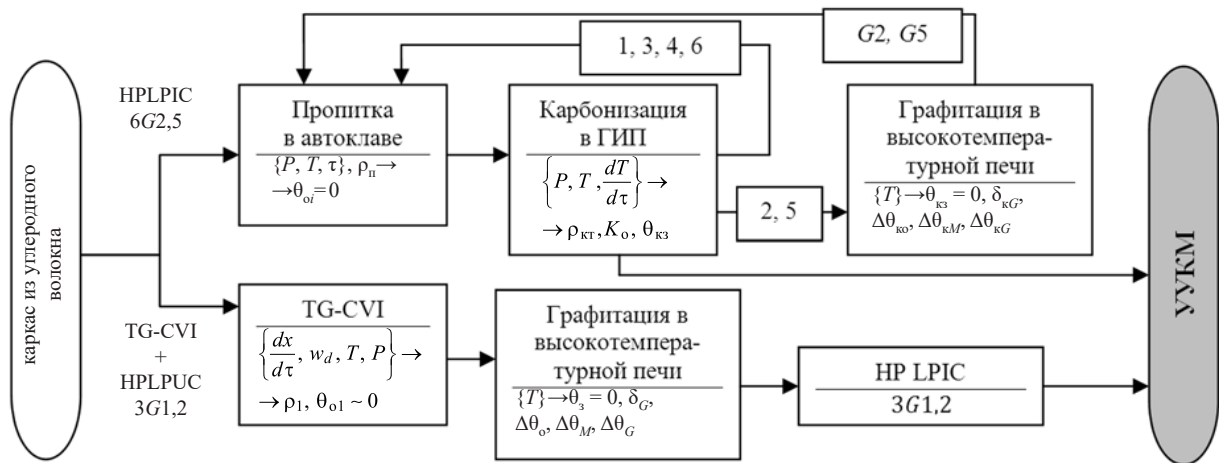


Рис. 2. Пример альтернативных маршрутов многоциклового уплотнения УУКМ (в фигурных скобках представлены оптимизируемые параметры процессов): маршрут уплотнения LP НРPIC 6G2,5 (шесть циклов уплотнения с графитацией после второго и пятого циклов) и маршрут комбинированного уплотнения TG-CVI + LP НРPIC 3G1,2 (три цикла с графитацией после первого и второго циклов)

Fig. 2. Example of alternative routes of multi-cycle compaction of carbon-carbon composite materials (optimized processes parameters are given in braces): compaction routes according to LP НРPIC 6G2,5 (six compaction cycles with graphitization after second and sixth cycles) and combined compaction route according to TG-CVI + LP НРPIC 3G1,2 (three cycles with graphitization after first and second cycles)

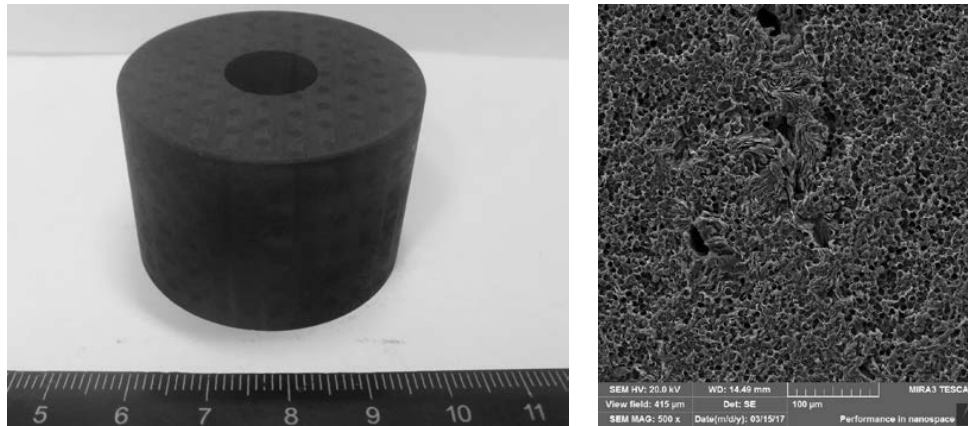


Рис. 3. Образец УУКМ ($\rho = 1,93 \text{ г/см}^3$, $\theta_0 = 6 \%$), изготовленный по технологии LP HPIC 6G1,4, и его микроструктура

Fig. 3. Carbon-carbon composite material sample ($\rho = 1.93 \text{ g/cm}^3$, $\theta_0 = 6 \%$) manufactured according to LP HPIC 6G1,4 and its microstructure

Полученный материал содержит углеродные волокна, собранные в пучки, и графитированную матрицу. Как видно из рис. 3, в структуре материала преобладают поры размером в десятки микрометров, оставшиеся преимущественно на месте крупных пустот между пучками волокон. На рис. 4 представлены результаты расчетов и измерений характеристик образцов.

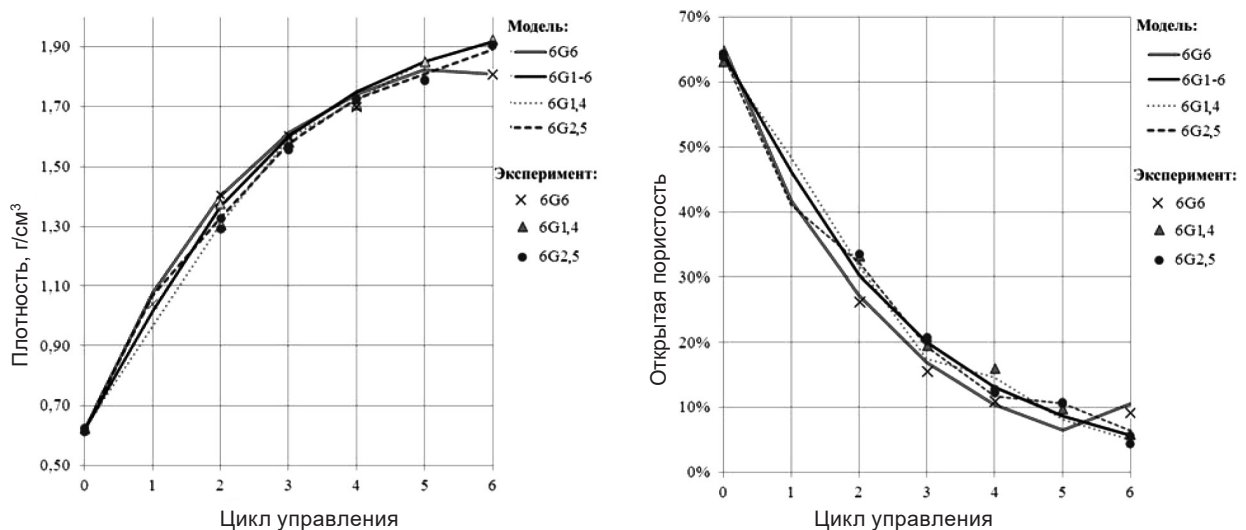


Рис. 4. Зависимость кажущейся плотности и открытой пористости УУКМ от маршрута жидкофазного уплотнения

Fig. 4. Apparent density and open porosity of carbon-carbon composite materials as a function of liquid-phase compaction route

Если графитацию проводить только после шестого цикла уплотнения (маршрут 6G6), полученный материал будет иметь наименьшую кажущуюся плотность и наибольшую открытую пористость из рассматриваемых вариантов. Максимальное значение кажущейся плотности образцов может быть получено при уплотнении по маршруту 6G1–6, когда графитацию проводят после каждого цикла уплотнения. В обоих этих случаях весь материал является термически стабилизированным. Образцы материала, полученные по маршрутам 6G1,4 и 6G2,5, незначительно отличаются по характеристикам от образцов, полученных по маршруту 6G1–6. Вместе с тем в таких образцах присутствует от 4,3 до 10,2 мас. % кокса, не прошедшего высокотемпературную обработку. Это приводит к некоторому снижению термической стабильности материала при высоких температурах эксплуатации.

Как видно из рис. 4, результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, что свидетельствует о корректности используемых допущений и метода расчета.

Предложенный метод расчета пригоден для прогнозирования характеристик УУКМ, полученных по любым другим маршрутам жидкофазного уплотнения.

Заключение. Таким образом, в результате анализа основных закономерностей процессов уплотнения методами HP LPIC и TG-CVI, а также процесса графитации были предложены условия оптимизации технологических режимов и маршрутов многоциклового уплотнения для получения высокоплотных УУКМ при минимальном числе циклов.

Разработан метод расчета, описывающий изменение кажущейся плотности и открытой пористости в течение многоциклового процесса уплотнения УУКМ по технологии LP HPIC с промежуточными графитациями. Результаты экспериментов подтвердили адекватность этого метода.

Метод расчета является полезным также при изменении параметров процессов уплотнения, когда изменяется, например, коксовый выход или количество закрытых пор, либо при замене исходного сырья, отличающегося по плотности.

Список использованных источников

1. Morgan P. Carbon fibers and their composites / P. Morgan. – Boca Raton, 2005. – 1131 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028744>
2. Ceramic- and Carbon-matrix Composite / ed. by V. I. Trefilov. – London, 1995. – 444 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1280-2>
3. Golecki, I. Rapid vapour-phase densification of refractory composites / I. Golecki // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 1997. – Vol. 20, N 2. – P. 37–124. [https://doi.org/10.1016/s0927-796x\(97\)00003-x](https://doi.org/10.1016/s0927-796x(97)00003-x)
4. Гурин, В. А. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов / В. А. Гурин, В. Ф. Зеленский // *Вопросы атомной науки и техники*. – 1999. – № 4(76). – С. 13–31.
5. Щурик, А. Г. Искусственные углеродные материалы / А. Г. Щурик. – Пермь, 2009. – 342 с.
6. Газофазное уплотнение углерод-углеродных композиционных материалов в установках с радиально движущейся зоной пиролиза / А. Ф. Ильющенко [и др.] // *Порошковая металлургия*. – Минск, 2021. – Вып. 44. – С. 155–165.

References

1. Morgan, P. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, 2005. 1131 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028744>
2. Trefilov V. I., ed. *Ceramic- and Carbon-matrix Composite*. London, 1995. 444 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1280-2>
3. Golecki I. Rapid vapour-phase densification of refractory composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 1997, vol. 20, no. 2, pp. 37–124. [https://doi.org/10.1016/s0927-796x\(97\)00003-x](https://doi.org/10.1016/s0927-796x(97)00003-x)
4. Gurin V. A., Zelensky V. F. Gas-phase methods for fabrication of carbon and carbon-carbon materials. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki* [Questions of Atomic Science and Technology], 1999, no. 4(76), pp. 13–31 (in Russian).
5. Shchurik A. G. *Artificial carbon materials*. Perm, 2009. 342 p. (in Russian)
6. Pyushchenko A. F., Andreev M. A., Prokhorov O. A., Suvorov A. N., Rosikhin M. I. Gas-phase densification of carbon-carbon composite materials in reactors with a radially moving pyrolysis zone. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. Minsk, 2021, vol. 44, pp. 155–165 (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – академик, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mail.belpak.by.

Прохоров Олег Александрович – канд. техн. наук, доцент, заведующий группой. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: prokhorov@tut.by.

Кривуленко Никита Владимирович – заведующий сектором. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kryvulenko@yandex.ru.

Information about the authors

Ilyushchenko Alexander F. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mail.belpak.by.

Prokhorov Oleg A. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Group. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prokhorov@tut.by.

Krivulenko Nikita V. – Head of the Sector. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kryvulenko@yandex.ru.