

УДК 621.039.66

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТИЕВОЙ КПС НА ОСНОВЕ КАРБОНОВОЙ ТКАНИ, АРМИРОВАННОЙ УНТ

Тулубаев Е.Ю., Понкратов Ю.В., Заурбекова Ж.А., Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Данная работа описывает технологию изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной углеродными нанотрубками. В работе описаны все основные этапы изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ. Приведены микроструктурные и рентгенофазные исследования изготовленного образца литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ, а также определены его плотность и теплопроводность.

Проведенные работы показали, что карбоновая ткань с поверхностью волокон, армированной УНТ, полностью смачивается жидким литием. Разработанная технология в полной мере подходит для изготовления образцов литиевой КПС для дальнейших исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедческие исследования, проводимые в рамках реализации международных программ по созданию термоядерных реакторов ИТЭР и ДЕМО, показали, что одним из наилучших материалов для применения в качестве ОПМ (обращенного к плазме материала) в установках управляемого термоядерного синтеза является жидкий литий и материалы на его основе [1–3]. Использование жидкого лития в качестве плазмообращенного материала особенно перспективно, если литий заключен в так называемую капиллярно-пористую систему (КПС) [4]. Основными преимуществами КПС, по сравнению с твердыми материалами, являются их устойчивость к деградации свойств и способность к самовосстановлению поверхности на основе капиллярных сил в условиях нормального плазменного разряда в установках термоядерного синтеза, а также при срывах плазмы.

Работы по данной тематике также ведутся и на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ. Установка на данный момент является единственным в мире токамаком, предназначенным для решения задач в области термоядерного материаловедения.

Казахстанскими учеными в сотрудничестве с ведущими в этой области международными научными организациями реализуется масштабный проект по созданию и испытанию макета литиевого дивертора (МЛД), который используется в токамаке КТМ, как один из сменных сегментов приемного диверторного устройства [5]. На рисунках 1–3 показаны некоторые этапы реализации этого проекта.

Особенностью МЛД является то, что в качестве обращенного к плазме материала используется литиевая КПС, которая установлена на приемную поверхность диверторного элемента и изготовлена на основе сетки из нержавеющей стали и вольфрамового войлока.

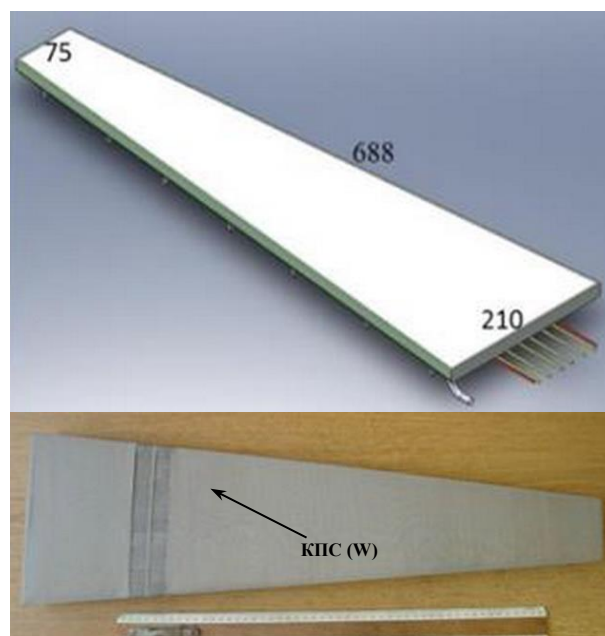


Рисунок 1. Конструктивная схема МЛД и КПС, смонтированная на модели дивертора

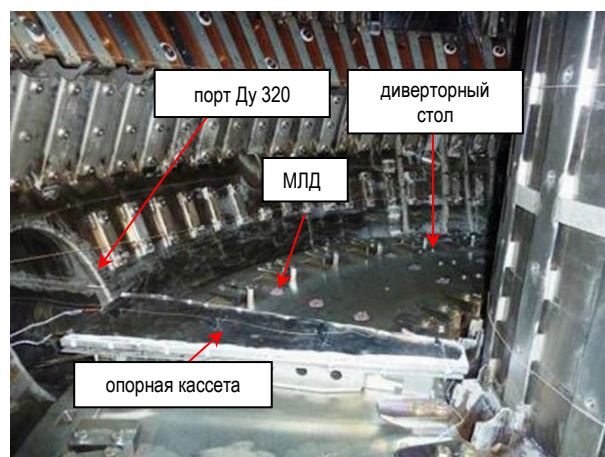


Рисунок 2. Размещение модели на диверторном столе токамака КТМ

Проводимые исследования подтвердили перспективность использования лития и литиевых технологий в установках управляемого термоядерного синтеза. Однако имеющаяся технология изготовления литиевых КПС требует дальнейшего развития с точки зрения оптимизации материала основной матрицы, в которую заключен жидкий литий. Важно определить основные технологические процедуры изготовления литиевых КПС с новым, ранее не применяемым материалом матрицы, таким как карбоновая ткань с синтезированными на поверхности волокон углеродными нанотрубками.

МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Литиевые КПС и их свойства

Идея использования жидкого лития в установках термоядерного синтеза получила развитие на основе использования сил поверхностного натяжения в капиллярных каналах, так называемых капиллярно-пористых системах (КПС). Этот композитный материал с жидкой и твердой составляющими может рассматриваться как новый класс материалов для токамаков, что позволит реализовать все преимущества жидких металлов и преодолеть инженерные проблемы при их использовании.

Различные пористые материалы могут служить в качестве основы КПС, но должны отвечать целому ряду специфических и часто противоречивых требований. Структура КПС должна состоять из открытых пор при специальном распределении их размера по сечению материала. Минимальный размер пор на поверхности и достаточно большие поры в теле материала или использование артериальной структуры должны обеспечивать максимальное капиллярное давление при низком гидравлическом сопротивлении, которое определяется соотношением:

$$P_C = 2 \sigma(T) \cdot \cos \theta / R_{\text{эфф}},$$

где θ – краевой угол смачивания, $R_{\text{эфф}}$ – эффективный радиус пор в капиллярной системе.

Капиллярное давление обеспечивает стабильность жидкого металла в условиях МГД-воздействий, предотвращая его разбрызгивание, способствует формированию и самовосстановлению поверхности вакуумной камеры (ВК) в процессе эксплуатации, подпитку и заполнение КПС жидким металлом. Для дальнейшего развития использования литиевых КПС в установках УТС необходимо исследовать возможности применения в качестве матрицы нового материала – карбонового волокна, армированного УНТ.

Углеродные нанотрубки и методы их синтеза

Углеродные нанотрубки представляют собой новый класс углеродных наноматериалов и углеродных каркасных структур со свойствами, которые в значительной степени отличаются от других форм углерода, таких как графит и алмаз.

Основная классификация углеродных нанотрубок проводится по количеству составляющих их

слоев. УНТ делятся на два вида: однослойные и многослойные.

Однослойные – простейший вид нанотрубок. Большинство из них имеют диаметр около 1 нм при длине, которая может быть во много тысяч раз больше. Структуру однослойных нанотрубок можно представить как «обертывание» гексагональной сетки графита (графена), основу которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода, в бесшовный цилиндр. Верхние концы трубок закрыты полусферическими крышечками, каждый слой которых составлен из шести- и пятиугольников, напоминающих структуру половины молекулы фуллерена (см. рисунок 3)

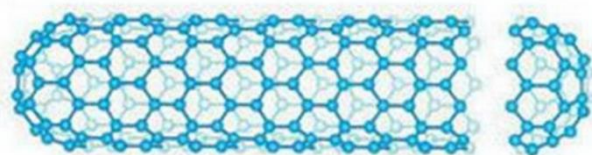


Рисунок 3. Графическое изображение однослойной нанотрубки

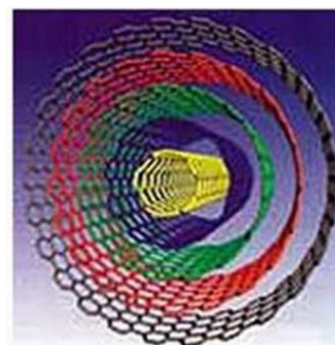


Рисунок 4. Графическое изображение многослойной нанотрубки (модель «матрешка»)

Многослойные – состоят из нескольких слоев графена, сложенных в форме трубки. Расстояние между слоями равно 0,34 нм, то есть такое же, как и между слоями в кристаллическом графите. Используют две модели для описания их структуры. Многослойные нанотрубки могут представлять собой несколько однослойных нанотрубок, вложенных одна в другую (так называемая «матрешка») (см. рисунок 4). В другом случае, один «лист» графена оборачивается несколько раз вокруг себя, что похоже на прокрутку пергамента или газеты (модель «пергамента») [6].

Наиболее распространенными методами синтеза нанотрубок являются электродуговой метод, лазерная абляция и химическое осаждение из газовой фазы (CVD).

Рассмотрев вышеописанные методы синтеза УНТ можно сказать, что в нашем случае для реализации цели исследований, наиболее приемлемым и доступным является CVD-метод.

Взаимодействия жидкого лития с материалами на основе углерода

Для разработки литиевых устройств, работающих в условиях термоядерных реакторов (ТЯР) и созданных на основе капиллярно-пористых систем из карбонового волокна, армированного углеродными нанотрубками, был проведен анализ физико-химических закономерностей взаимодействия жидкого лития с графитом и материалами на его основе. Под «условиями ТЯР» предполагается работа систем, содержащих жидкий литий в условиях вакуума не хуже 10^{-2} Па при температурах в стационарном состоянии до ~ 873 К и кратковременно до ~ 1273 К. Как известно, в системе литий-углерод образуется стабильный карбид Li_2C_2 , имеющий ряд аллотропических превращений (см. рисунок 5).

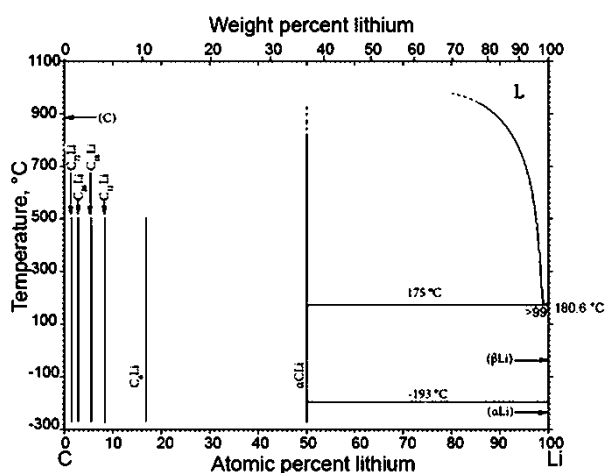


Рисунок 5. Li-C диаграмма состояния углерод – литий [7]

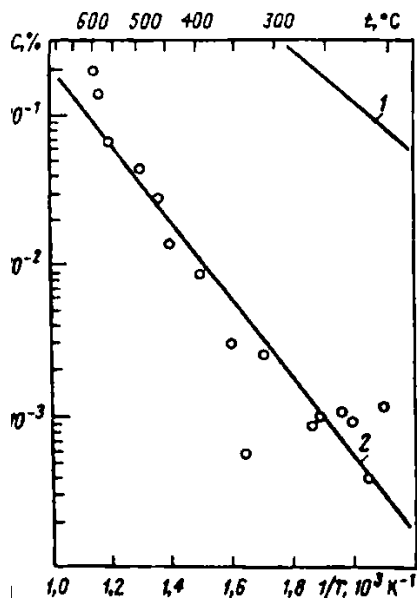


Рисунок 6. Растворимость углерода в литии

Литий с Li_2C_2 образует эвтектику с температурой плавления 438–448 К, в которой содержится около 2,8 % карбида лития [8, 9]. Растворимость углерода

в жидком литии (C, %) в соответствии с приведенной в [8] диаграммой определяется зависимостью:

$$\ln C = 5,772 - 3885 \cdot T^{-1}.$$

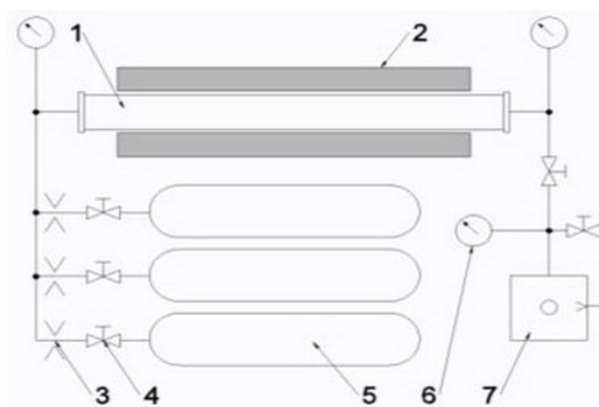
Столь высокие значения растворимости, близкие к растворимости азота в литии, не подтверждаются более поздними данными (см. рисунок 6), результаты которых рекомендуются для использования.

Это дает основание рассчитывать на приемлемый уровень коррозионной совместимости углеродных нанотрубок с жидким литием в условиях ТЯР.

АРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ КПС УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Установка для синтеза УНТ

Для изготовления матрицы КПС из карбоновой ткани, армированной УНТ, была использована ранее разработанная установка, состоящая из реактора и газораспределительной системы (см. рисунок 7).



1 – резистивная печь; 2 – кварцевый реактор; 3 – игольчатый нагреватель; 4 – вентиль; 5 – емкость с рабочим газом; 6 – датчик давления; 7 – форвакуумный насос

Рисунок 7. Принципиальная схема установки для синтеза УНТ

Реактор состоит из кварцевой трубчатой печи с резистивным нагревом, диапазон рабочих температур от 773 К до 1273 К. В печь помещен проточный кварцевый реактор, оснащенный фланцами KF-25 для создания герметичного рабочего объема с необходимой атмосферой контролируемого состава. Температура печи контролируется термопарой K-типа (хромель-алюмель), расположенной в средней части нагревательной спирали, и регулируется цифровым контроллером температуры OMRON E5CN, который управляет твердотельным реле мощностью 40 А.

Установка позволяет использовать в качестве транспортных газов азот, аргон, гелий из баллонов и водород, получаемый из генератора водорода электролизного типа.

Синтез УНТ на карбоновой ткани

Образец карбоновой ткани с предварительно нанесенным слоем катализатора (см. рисунок 8, а), который представлял из себя наночастицы оксида никеля, был помещен в установку для синтеза УНТ.

Нагрев образца проводился в атмосфере водорода. Во время нагрева за счет восстановления наночастиц оксида никеля происходило образование наночастиц чистого металлического никеля, которые служили в дальнейшем катализаторами для роста УНТ. При достижении 923 К температура была стабилизирована, после чего в реактор напущены пары этилового спирта для синтеза УНТ. Получение паров спирта было реализовано путем направления потока водорода через барботер, заполненный этанолом. Пропускание водорода через барботер продолжалось в течение 15 минут. Ранее проведенные исследования показали, что за это время поверхность каталитических частиц успевает деактивироваться, и рост УНТ прекращается, соответственно, дальнейшее продолжение синтеза не требуется. После завершения процесса печь остывала естественным образом в потоке водорода. После остывания в атмосфере водорода до температуры ниже 423 К изготовленный образец был извлечен из установки (рисунок 8, б).



а)



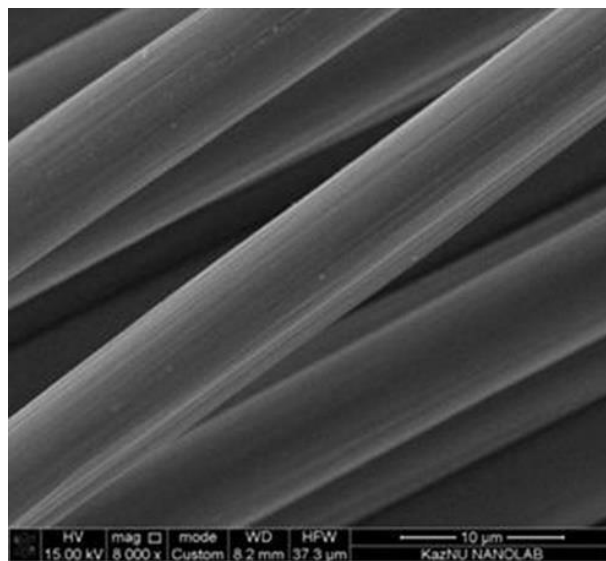
б)

Рисунок 8. Образец матрицы КПС на основе:
(а) – карбоновой ткани без УНТ ткани;
(б) – карбоновой ткани, армированной УНТ

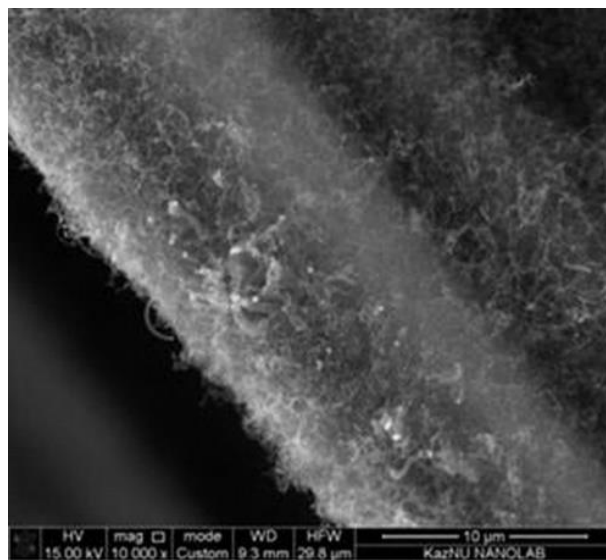
Структура полученного образца была проанализирована методом SEM и рамановским рассеянием (см. рисунки 9, 10). На рисунке 9 показаны электронно-микроскопические снимки ткани до синтеза (см. рисунок 9, а) и ткани после синтеза УНТ (см.

рисунок 9, б). Видно, что ткань до синтеза УНТ являлась чистой, после синтеза на ней появились УНТ.

Рамановские спектры ткани до синтеза (см. рисунок 10, а) показывают наличие двух основных полос D и G, расположенных при частотах 1355 см^{-1} и 1590 см^{-1} соответственно, что характерно для аморфного углерода. В рамановских спектрах ткани после синтеза (см. рисунок 10, б) линии D и G имеют незначительную полуширину, также присутствуют линии 2D и D + G. Пик RBM соответствует радиальным колебаниям (radial breathing mode). Такие спектры характерны для многостенных УНТ.

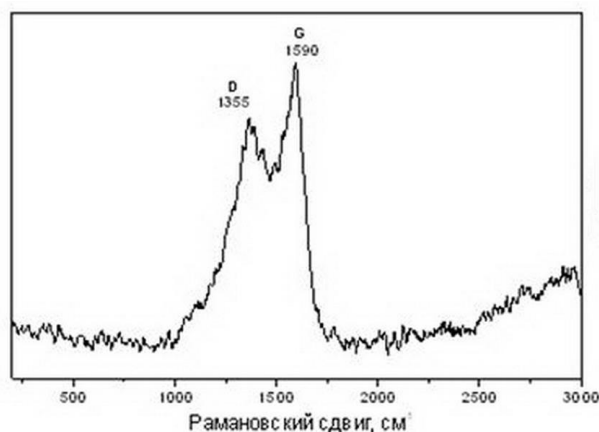


а)

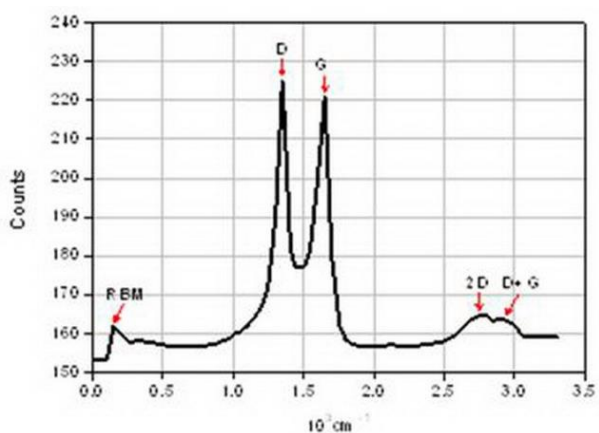


б)

Рисунок 9. SEM снимок ткани без УНТ (а) и с УНТ (б)



а)



б)

Рисунок 10. Рамановский спектр ткани без УНТ (а) и с УНТ (б)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦА ЛИТИЕВОЙ КПС

Устройство для изготовления

Для изготовления образца литиевой КПС было разработано специальное экспериментальное устройство (см. рисунок 11), расположенное на установке ВИКА (см. рисунок 12).

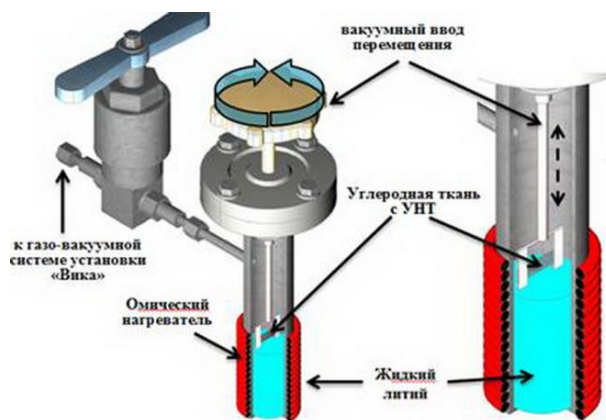


Рисунок 11. Устройство для заливки КПС жидким литием

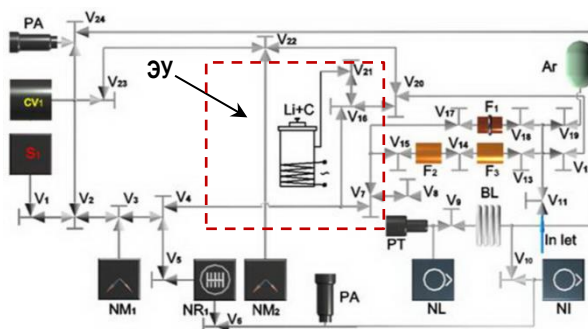


Рисунок 12. Экспериментальное заливное устройство, подсоединенное к газ-вакуумной системе установки ВИКА

Технология изготовления литиевой КПС

Этапы изготовления литиевой КПС были следующими. Сначала образец из карбоновой ткани с синтезированными на поверхности волокон УНТ размером 10×30 мм был закреплен в рамку из нержавеющей стали (см. рисунок 13). Рамка, в свою очередь, крепилась на гермовводе экспериментального устройства (см. рисунок 13). Далее, в соответствии с ранее разработанной технологией, были проведены процедуры изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани с УНТ, которые заключались в следующем:

- после загрузки очищенного лития и матрицы КПС в экспериментальное устройство, и откачки до давления не выше 10⁻⁵ Па, при помощи резистивного нагревателя литий был разогрет до температуры 473 К и находился на стационаре в течение часа в условиях непрерывной откачки;

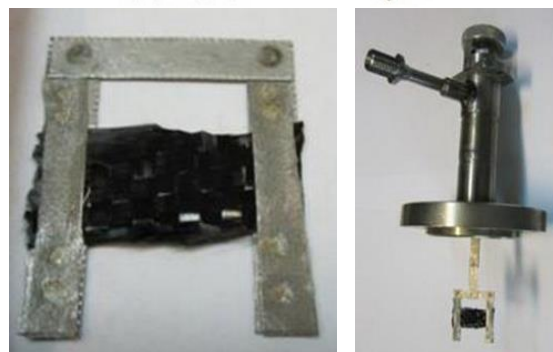
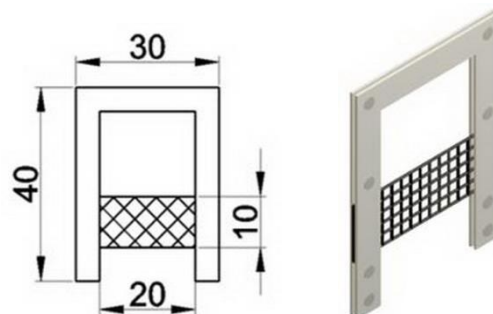


Рисунок 13. Образец, закрепленный в рамку из нержавеющей стали 12X18H10T

- затем литий нагревался до температуры 673 К и при достижении полки при помощи вакуумного ввода перемещения, матрица КПС была опущена в жидкий литий на глубину от 2 до 3 мм и находилась в таком положении в течение 40 минут;
- далее литий нагревался до температуры 773 К и при достижении стационара по температуре находился при таком режиме в течение 20 минут;
- затем литий нагревался до температуры 873 К и при достижении стационара по температуре находился при таком режиме в течение 10 минут;
- после чего, предварительно закрыв откачку, в объем экспериментального устройства был напущен чистый аргон до давления порядка $13,3 \cdot 10^3$ Па и образец был медленно выведен из жидкого лития. Через 10 минут выключался нагрев и происходило естественное остывание экспериментального устройства.

Изготовление опытного образца

В результате проведенных процедур был изготовлен опытный образец литиевой КПС на основе карбоновой ткани с синтезированными на поверхности волокон УНТ (см. рисунок 14).

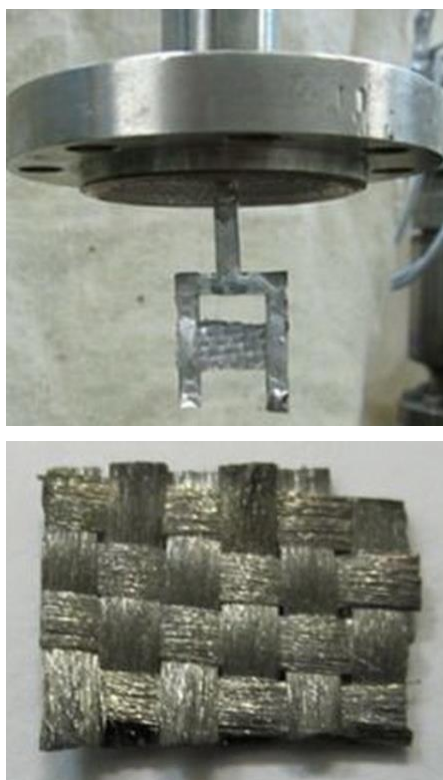


Рисунок 14. Изготовленный опытный образец литиевой КПС

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ИЗГОТОВЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЛИТИЕВОЙ КПС

Микроструктурные исследования

В последующем изготовленный образец был подвергнут исследованию методом электронной сканирующей микроскопии.

Исследования были проведены при помощи электронного сканирующего микроскопа Quanta 200i 3D (FEI Company). На рисунке 15 приведены СЭМ изображения поверхности образца литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ.

Изучение микроструктуры поверхности образцов показало, что матрица из карбоновой ткани с поверхностью волокон, покрытой УНТ, полностью заполнена металлическим литием. Поверхностная структура характеризуется как цельнометаллическая.

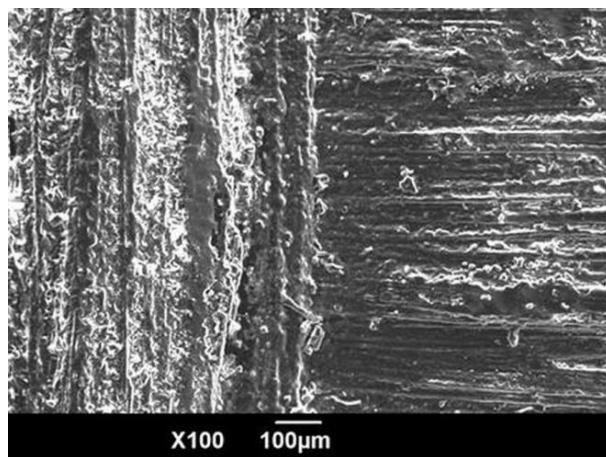


Рисунок 15. Микрофотографии изготовленного образца литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ (увеличение $\times 100$)

Рентгенофазовый анализ

Также в дальнейшем были проведены исследования с целью определения фазового состава изготовленных образцов литиевых КПС. Дифрактограммы были получены на дифрактометре Empyrean с использованием программного обеспечения для обработки и поиска “HighScore”. Для идентификации фазового состава образца по средствам программы для обработки и поиска “HighScore” используется база данных [10]. Одна и полученных дифрактограмм представлена на рисунке 16.

По результатам первоначальных исследований можно сказать, что в образце литиевой КПС обнаружены следующие фазы: металлический литий, диоксид лития, ацетиленид лития двух разновидностей, гидроксид лития и карбонат лития. Надежно идентифицировать присутствие графита в фазовом составе не удалось. В связи с этим были проведены дополнительные рентгенофазовые исследования образцов литиевых КПС на основе углеродной ткани, армированной УНТ. В результате исследований было определено соотношение элементов в данном композитном материале которое составило: $\sim 60\%$ (Li), $\sim 29\%$ (C), $\sim 9,5\%$ (L_2C_2) и менее $1,5\%$ примесей (диоксид лития, гидроксид лития, гидрокарбонат лития, нитрид и нитрат лития, а так же остальные неметаллические примеси).

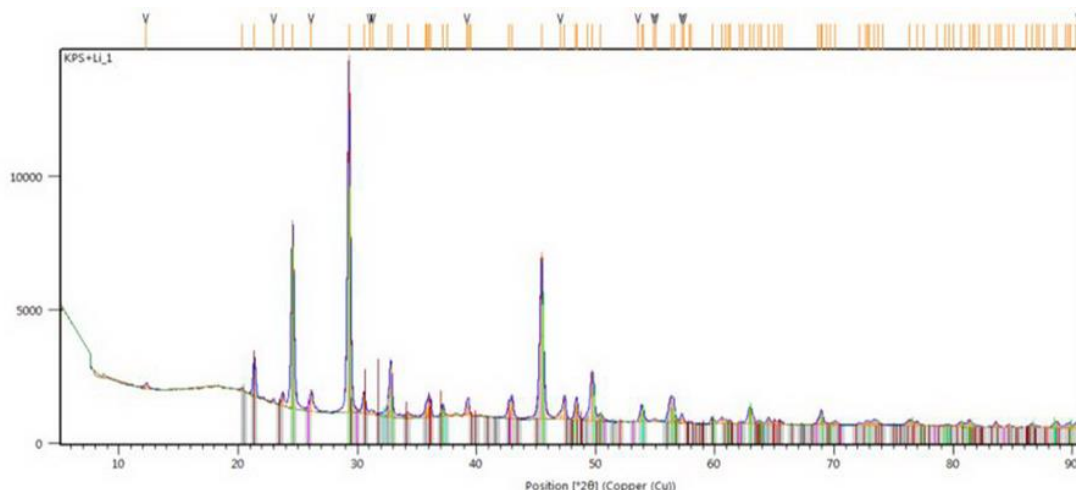


Рисунок 16. Общий вид полученной дифрактограммы

Свойства литиевой КПС, армированной УНТ

В дальнейшем на основании проведенного рентгенофазового анализа были определены основные свойства образца литиевой КПС, такие как плотность и коэффициент теплопроводности.

Очевидно, что в основном состав образцов литиевой КПС определяют объемные доли лития, ацетиленида лития и матрицы из углеродной ткани, армированной УНТ. Плотность литиевой КПС была рассчитана по следующей формуле:

$$\rho_{\text{cps}} = \sum_i \rho_i \frac{\omega_{v_i}}{100\%}, \quad (3)$$

где ρ_i – плотность элемента литиевой КПС, ω_{v_i} – объемная доля i -го элемента литиевой КПС, $i = 1, 2, 3$. Плотность литиевой КПС составила порядка $\sim 0,97 \text{ г/см}^3$.

Одним из важнейших свойств литиевой КПС, определяющим целесообразность ее использования в будущих ТЯР, является коэффициент теплопроводности. Следует отметить, что коэффициент теплопроводности КПС с литием $\lambda(T)$ был рассчитан при использовании двух расчетных моделей – модели параллельных слоев и модели последовательных слоев. В первом случае:

$$\lambda(T) = (1 - \varepsilon)\lambda_k(T) + \varepsilon\lambda_{\text{Li}}(T), \quad (4)$$

где ε – объемная пористость КПС; $\lambda_k(T)$ – коэффициент теплопроводности карбоновой ткани КПС; $\lambda_{\text{Li}}(T)$ – коэффициент теплопроводности лития.

Во втором случае:

$$\lambda(T) = \left((1 - \varepsilon) / \lambda_k(T) + \varepsilon / \lambda_{\text{Li}}(T) \right)^{-1}. \quad (5)$$

Также расчеты проводились для различных фазовых состояний лития, твердого и жидкого. В результате проведенных расчетов определены коэффициенты теплопроводности литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ: с литием в твердой фазе, при $455 \text{ К} - 42,6 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; с литием в жид-

кой фазе, при $460 \text{ К} - 26,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. Нужно отметить, что из-за высокого значения коэффициента теплопроводности лития, коэффициент теплопроводности литиевой КПС определяется, в основном, объемным содержанием лития в образце, и в этом случае значением коэффициента теплопроводности ацетиленида лития можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы был проведен литературный обзор, в ходе которого рассмотрены и проанализированы свойства литиевых КПС и принципы их работы, свойства углеродных нанотрубок и методы их синтеза, характер взаимодействия углеродных материалов с жидким литием при различных температурах.

По ранее разработанной технологии, на установке для синтеза УНТ, с использованием CDV-метода, было проведено армирование углеродными нанотрубками матрицы КПС из карбоновой ткани, после чего выполнена характеристика этой матрицы при помощи электронной микроскопии и рамановской спектроскопии. Разработано и создано заливное устройство для изготовления образцов литиевых КПС, разработана и опробована процедура заливки КПС жидким литием. Проведен эксперимент, в результате которого изготовлен опытный образец литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ. С целью характеристики опытного образца были проведены микроструктурные исследования и рентгенофазный анализ литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ, а также определены его плотность и теплопроводность.

Проведенные работы показали, что карбоновая ткань с поверхностью волокон, армированной УНТ, полностью смачивается жидким литием, а разработанная технология в полной мере подходит для изготовления образцов литиевой КПС. В дальнейшем, по разработанной технологии, будут изготавливаться исследовательские образцы литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ, с целью

проведения испытаний данного композитного материала в условиях моделирующих режимы эксплуа-

тации установок управляемого термоядерного синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. FTU results with a liquid lithium limiter. G. Mazzitelli, M.L. Apicella, D. Frigione, G. Maddaluno, M. Marinucci, C. Mazzotta, V. Pericoli Ridolfini, M. Romanelli, G. Szepesi, O. Tudisco Published 25 May 2011 • 2011 IAEA, Vienna Nuclear Fusion, Volume 51, Number 7.
2. NSTX plasma operation with a Liquid Lithium Divertor. H.W. Kugel, J.P. Allain, M.G. Bell, R.E. Bell, A. Diallo, R. Ellis, S.P. Gerhardt, B. Heim, M.A. Jaworski, R. Kaita, J. Kallman, S. Kaye, B.P. LeBlanc, R. Maingi, A. McLean, J. Menard, D. Mueller, R. Nygren, M. Ono, S.F. Paul, R. Raman, et al. Fusion Engineering and Design, Volume 87, Issue 10, October 2012, Pages 1724-1731.
3. Recent lithium experiments in tokamak T-11M. S.V. Mirnov, A.M. Belov, N.T. Djigailo, A.N. Kostina, V.B. Lazarev, I.E. Lyublinski, V.M. Nesterenko, A.V. Vertkov. Journal of Nuclear Materials, Volume 438, Supplement, July 2013, Pages S224-S228.
4. Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium I. Lyublinski, A. Vertkov, S. Mirnov, V. Lazarev. Journal of Nuclear Materials, Volume 463, August 2015, Pages 1156-1159.
5. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak Igor E. Lyublinski, Alexey V. Vertkov, Mikhail Yu. Zharkov, Vladimir V. Semenov, Sergey V. Mirnov, Vladimir B. Lazarev, Irina L. Tazhibayeva, Gennadiy V. Shapovalov, Timur V. Kulsartov, Alexandr V. D'yachenko, Giuseppe Mazzitelli, Pietro Agostini Fusion Engineering and Design, Volume 88, Issues 9–10, October 2013, Pages 1862-1865.
6. Углеродные нанотрубки: виды и области применения [Электронный ресурс] / Электрон. дан. — М.: Информационно-аналитическое агентство Cleandex, 10.12.2007. — Режим доступа: <http://www.cleandex.ru/articles/2007/12/10/nanotubes-carbon,свободный>. — Углеродные нанотрубки: виды и области применения.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Том 1. Под ред. академика РАН Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996 – 728-729 с.
8. Гришин В.К., Глазунов М.Г., Аракелов А.Г. и др. Свойства лития. М.: Металлургиздат, 1963.
9. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов. Пер. с англ. под ред. И.И. Новикова и И.Л. Рогельберга. М.: Металлургиздат, 1973.
10. Crystallography Open Database (далее – COD. Gražulis, S.; Chateigner, D.; Downs, R. T.; Yokochi, A. F. T.; Quirós, M.; Lutterotti, L.; Manakova, E.; Butkus, J.; Moeck, P. & Le Bail, A.; Crystallography Open Database - an open-access collection of crystal structures, J. Appl. Cryst., 2009, 42, 726-729).

ЛИТИЙЛІ ККЖ-ГЕ КОМІРТЕКТІ МАТЕРІАЛ НЕГІЗІНЕ КОМІРТЕКТІ НАНОТҮТІКШЕЛЕР КҮШЕЙТІЛІММЕН ТЕХНОЛОГІЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Е.Ю. Тулубаев, Ю.В. Понкратов, Ж.А. Заурбекова, Ю.Н. Гордиенко, Н.И. Барсуков

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты», Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыс сипаттайды дайындау технологиясын литийлі, ККЖ негізінде карбон материал негізіне күшейтіліммен көміртегі нанотүтікшелер. жұмыста сипатталған барлық негізгі кезеңдерін дайындау литийлі ккж негізінде карбон мата арматураланған унт. келтірілген микроструктурные және рентгенофазные зерттеу дайындалған үлгідегі литийлі ККЖ негізінде карбон мата, арматураланған УНТ, сондай-ақ анықталған оның тығыздығы және жылу өткізгіштігі.

Жүргізілген жұмыстар көрсеткендей, карбон қышқылы материал негізіне бетіне талшықтар арматураланған, көміртекті нанотүтікшелер, толық жабылады сұйық литийлі. Әзірленген технология толық көлемде үшін қолайлы үлгілерді дайындау литийлі ККЖ үшін одан әрі зерттеу.

TECHNOLOGY OF DEVELOPMENT THE LITHIUM CPS ON THE BASED OF CARBOXYLIC FABRIC OF REINFORCED CNT

Ye.Yu. Tulubayev, Yu.V. Ponkratov, Zh.A. Zaurbekova, Yu.N. Gordienko, N.I. Barsukov

Branch “Institute of Atomic Energy” NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper describes the technology of development lithium CPS based on carbon fiber reinforced carbon nanotubes. The paper describes all the main stages of development of lithium-based CPS based on the carbon fiber of a reinforced CNT. Microstructural and X-ray phase studies of the manufactured sample of lithium CPS based on carbon fiber reinforced with CNTs are also presented, and its density and thermal conductivity are determined.

The carried out work showed that the carboxylic fabric with the surface of fibers reinforced with CNTs is completely wetted with liquid lithium. The technology developed is fully suitable for the production of lithium CPS samples for further research.