

УДК 621.039.6

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ ТОКАМАКА

*И.Е. Люблинский^{1, 2}, А.В. Вертков¹, В.В. Семенов¹*¹ОАО «Красная Звезда», Москва, Россия²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Использование капиллярно-пористых систем (КПС) с жидкими Li, Ga, Sn рассматривается в качестве альтернативы для решения проблемы создания внутрикамерных компонентов (ВК) термоядерного источника нейтронов (ТИН) и реактора типа ДЕМО. Основными преимуществами КПС с жидким металлом по сравнению с твёрдыми материалами являются их устойчивость к деградации свойств в условиях токамака и способность к самовосстановлению поверхности. Оценка применимости жидких металлов проводится на основе анализа их физических и химических свойств, взаимодействия с плазмой токамака, конструктивных и технологических особенностей ВК с КПС, реализующих применение этих металлов в токамаке. Показано, что верхний предел рабочей температуры ВК для всех рассматриваемых легкоплавких металлов лежит в интервале 550—600 °С. Для ВК с Li решающим фактором является ограничение по допустимому потоку атомов в плазму, с Ga и Sn — коррозионная стойкость конструкционных материалов. Для рассмотренной перспективной конструкции ВК с использованием Li, Ga, Sn верхний предел тепловых нагрузок в стационарном режиме работы близок к 18—20 МВт/м². Из проведённого анализа видно, что использование металлов с низким давлением равновесного пара (Ga, Sn) не даёт выигрыша в расширении области допустимых рабочих температур ВК. Однако по совокупности свойств, возможности реализации эффекта самовосстановления и стабилизации жидкой поверхности, влиянию на параметры плазменного разряда и способности защитить поверхность ВК в условиях плазменных возмущений и срывов литий является наиболее привлекательным жидким металлом для создания ВК на основе КПС для токамаков.

Ключевые слова: капиллярно-пористые системы, легкоплавкие металлы, внутрикамерные элементы, термоядерный реактор, токамак.

COMPARATIVE ANALYSES OF LOW MELTING METALS APPLICATION WITH CAPILLARY-PORE SYSTEMS IN TOKAMAK CONDITIONS

*I.E. Lyublinski^{1, 2}, A.V. Vertkov¹, V.V. Semenov¹*¹Public JSC «Red Star», Moscow, Russia²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Capillary-pore systems (CPS) with liquid metals are considered as advanced plasma facing elements (PFE) for application in DEMO-type fusion reactor and fusion neutron source. The main advantages of low melting metals in CPS with respect to solid materials are the possibility to provide surface self-healing and high resistance to degradation of properties. The estimation of opportunity of liquid Li, Ga and Sn application is carried out on the basis of their physical, chemical and technological properties, and with respect to prospective design of the tokamak in-vessel elements. The temperature limit for normal operation of CPS with Li, Ga, Sn is about 550—600 °C. For Li application it is determined by appropriate flux to the plasma due to evaporation and for Ga and Sn — by corrosion resistance limit. Surface temperature analysis for possible in-vessel element design has shown the similar power flux limit ~18—20 MW/m² for Li, Ga and Sn application at normal operation. It is clear that application of liquid metals with low vapor pressure (Ga, Sn) does not increase PFE operation limit. The property combination, well-demonstrated possibility for surface self-healing, favorable effect on tokamak plasma parameters offer the advantage of Li. The CPS with Li has the priority for ELEs and at disruption conditions taking into account very high latent heat of vaporization and screening effect with re-radiation. Now Li is the most attractive and most investigated liquid metal for fusion devices application with CPS.

Key words: capillary-pore systems, low melting metals, plasma facing elements, fusion reactor, tokamak.

ВВЕДЕНИЕ

Использование капиллярно-пористых систем (КПС) с жидкими металлами рассматривается в качестве альтернативы для решения проблем, связанных с применением традиционных твёрдых материалов при разработке обращённых к плазме ВК термоядерного источника нейтронов (ТИН) и реактора типа ДЕМО [1—3]. Основными преимуществами КПС по сравнению с твёрдыми материалами являются их устойчивость к деградации свойств и способность к самовосстановлению поверхности ВК на основе капиллярных сил в условиях нормального разряда термоядерного реактора, ЭЛМов и срывов. Литий, гал-

лий и олово рассматриваются в качестве возможных легкоплавких металлов для применения совместно с КПС в токамаках [5—7].

Обоснованный выбор жидкого металла должен опираться на всесторонний анализ следующих аспектов их использования: обеспечение смачивания для реализации возможности самообновления и стабильности жидкометаллической поверхности; коррозионная совместимость с материалами КПС и конструкции ВК в условиях воздействия нормального разряда, плазменных неустойчивостей и срывов; величина возможного поступления атомов этих металлов в плазму и влияние на её параметры; технологические особенности использования этих металлов и безопасность; взаимодействие с плазмообразующими газами и наличие технологии их извлечения. Важным моментом является учёт конструктивных особенностей ВК, реализующих применение этих металлов в токамаке и их рабочих параметров.

Учёт всех этих аспектов позволит определить допустимые интервалы рабочих параметров ВК на основе рассматриваемых металлов и оценить применимость. В статье проведено расчётно-экспериментальное сравнение возможности применения Ga, Sn и Li в токамаке с материаловедческой и конструкторской точки зрения.

ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ЛЕГКОПЛАВКОГО МЕТАЛЛА

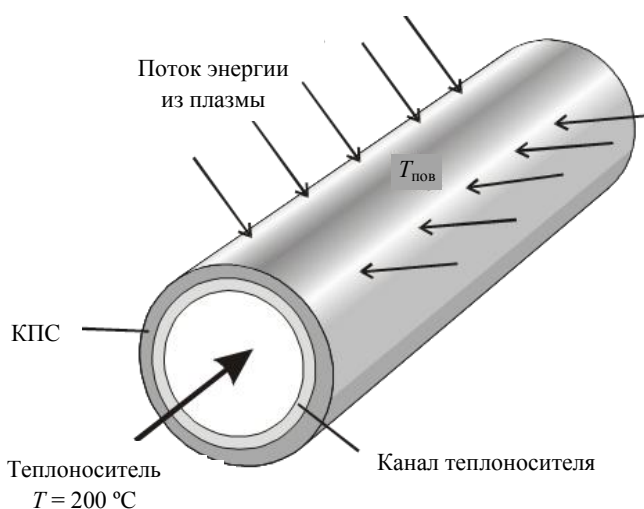


Рис. 1. Схема обращённого к плазме ВК на основе КПС с жидким металлом

Сравнительный анализ свойств рассматриваемых легкоплавких металлов для использования в токамаке производился с учётом возможной конструкции ВК и применяемых конструкционных материалов. Предполагается, что конструктивная схема стационарного ВК (рис. 1), отвечающего требованиям по обеспечению отвода тепловых потоков на уровне 20 МВт/м^2 , представляет собой тонкостенный канал (толщина стенки $\sim 1\text{—}2 \text{ мм}$) для протока теплоносителя, изготовленного из коррозионно-стойкого и теплопроводного материала (в анализируемом случае молибден). Внешняя поверхность канала покрыта КПС толщиной 1 мм из вольфрамового войлока с пористостью 50% , смоченного легкоплавким металлом.

Капиллярный эффект. Капиллярные силы являются определяющим фактором в концепции

применения КПС с жидкими металлами. Они обеспечивают стабильность жидкого металла в условиях МГД-воздействий, предотвращая его разбрызгивание, формирование и самовосстановление поверхности ВК в процессе эксплуатации, подпитку и заполнение КПС жидким металлом. Величина капиллярного давления P_c , характеризующая эффективность КПС, описывается выражением $P_c = 2\sigma \cos\Theta/r$, где Θ — краевой угол смачивания; σ — поверхностное натяжение жидкого металла; r — эффективный радиус пор КПС. Величина σ характеризует свойство самого жидкого металла, Θ — взаимодействие жидкого металла с твёрдой поверхностью конструкционных материалов. Значения величины поверхностного натяжения рассматриваемых металлов приведены в табл. 1 [1, 8]. Несмотря на то, что поверхностное натяжение Ga и Sn выше по отношению к Li в 1,7 и 1,4 раза соответственно, решающее влияние на величину капиллярного давления оказывает краевой угол смачивания. В данном случае только Li имеет полное смачивание большинства конструкционных металлов и сплавов ($\Theta = 0$). Для Ga и Sn в контакте с твёрдым W или Mo величина Θ не опускается ниже $\pi/4$ [9] даже в условиях специальных мер по обеспечению смачивания. Таким образом, величины P_c расплавов Li, Ga, Sn для реалистичной величины $r = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ оказываются весьма близкими к 18 кПа и различаются не более чем на 5% . Следует отметить, что уровень P_c рассматриваемой КПС обеспечивает стабильность этих жидких металлов при МГД-воздействиях в токамаках с индукцией магнитного поля до $\sim 6 \text{ Тл}$.

Таблица 1. Основные свойства Li, Ga, Sn

Свойство	Металл		
	Li	Ga	Sn
Атомный номер Z	3	31	50
Удельная плотность, кг/м^3	530	5910	7310
Температура плавления, К	453	302	505
Температура кипения, К	1613	2676	2543
Давление пара, Па (1300 К)	6710	0,96	0,03
Скрытая теплота парообразования, МДж/кг	21,1	3,9	2,5
Теплоёмкость, Дж/(кг·К) (700 К)	4420	345	255
Теплопроводность, Вт/(м·К) (700 К)	47	27	32
Поверхностное натяжение, Н/м (700 К)	0,40	0,69	0,55

Величина капиллярного поднятия (рис. 2), характеризующая способность КПС к подпитке и заполнению пор, для Ga и Sn оказывается существенно ниже по сравнению с литием, что объясняется их высокой удельной плотностью (см. табл. 1).

Таким образом, с точки зрения капиллярного эффекта применение Li имеет существенные преимущества по сравнению с рассматриваемыми легкоплавкими металлами.

Физические свойства. Из анализа физических свойств (см. табл. 1) следует, что существенным преимуществом Ga и Sn является низкое давление насыщенных паров над поверхностью расплава (высокая температура кипения) по сравнению с Li. Для Li температурный предел применения, определяемый предельно допустимым потоком испаренных атомов в плазму, составляет $\sim 550\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$. Для Ga и Sn, даже с учётом более жёстких ограничений по поступлению атомов с большими Z , он заметно выше, что и является основной мотивацией для их рассмотрения в качестве материалов, обращённых к плазме токамака.

Для рассматриваемой конструкции ВК величины отводимых тепловых потоков (рис. 3) при сравнимых температурах приёмной поверхности КПС определяются теплофизическими свойствами жидких металлов и материала основы КПС. В случае КПС из W при температуре поверхности $600\text{ }^\circ\text{C}$ они близки и лежат в интервале $17\text{--}19\text{ МВт/м}^2$. Однако в случае КПС из нержавеющей стали, материала с значительно более низкой теплопроводностью, для Ga и Sn эти потоки заметно ниже.

Коррозионная совместимость. Конструкционные материалы КПС и ВК должны быть устойчивы к коррозионному воздействию рассматриваемых легкоплавких металлов как в интервале их рабочих температур, так и при температурах техно-

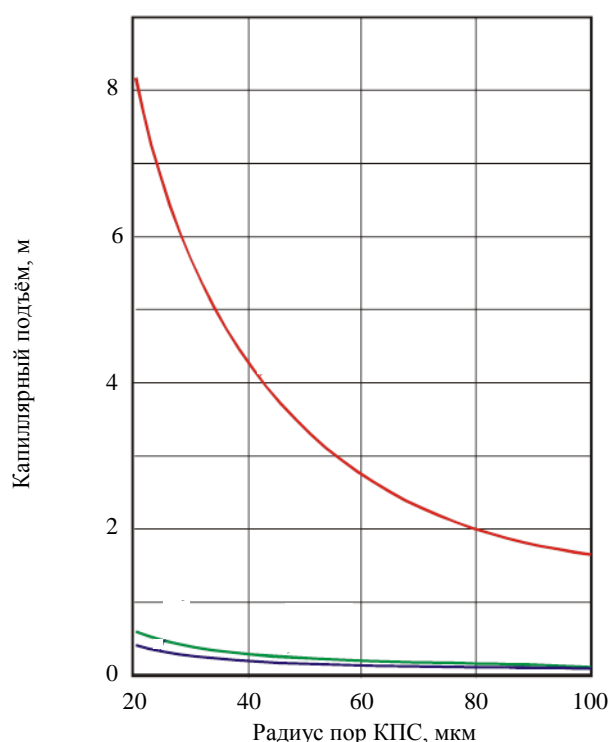


Рис. 2. Величина капиллярного поднятия жидких металлов в КПС: — Li; — Ga; — Sn

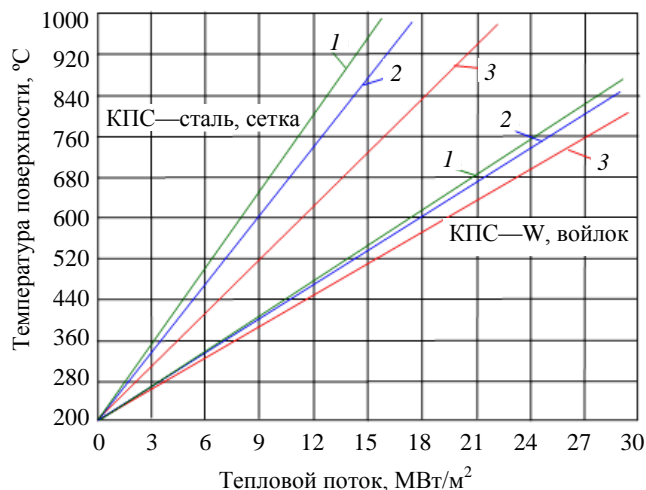


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности ВК от теплового потока для КПС и жидких металлов: 1 — Ga; 2 — Sn; 3 — Li

логической подготовки (отжиг для обеспечения смачивания). Совместимость широкого круга конструкционных материалов (нержавеющие стали различных классов, тугоплавкие металлы и сплавы на их основе) с Li достаточно хорошо изучена [1, 10], однако экспериментальных данных по совместимости с Ga и Sn явно недостаточно. Температурные пределы приемлемой коррозионной стойкости ряда конструкционных материалов в Li приведены в табл. 2.

Таблица 2. Температурный предел совместимости материалов с Li [1, 10]

Материал	Максимальная температура, °С
Аустенитная сталь типа SS316	700
Ферритно-мартенситная сталь типа НТ-9	800
Сплавы ванадия	900
Сплавы молибдена	1200
Сплавы вольфрама	1500

По имеющимся данным только Be, W, Ta, Re и их сплавы совместимы с Ga и Sn при температуре до 600 °С [11]. Нержавеющие стали устойчивы к их воздействию только при температуре ниже 400 °С [12]. Результаты специально проведенных исследований по оценке коррозионной стойкости нержавеющей стали, сплавов V, Mo и W в Ga и Sn показали, что только сплав W, который не смочился жидким металлом и сохранил исходные механические свойства, является потенциально устойчивым в контакте с Ga при температуре выше 600 °С. Остальные материалы подвержены сильному растворению (рис. 4) и утратили механические свойства под воздействием Ga. Судя по характеру коррозионного воздействия Sn на нержавеющую сталь (рис. 5), воздействие этого легкоплавкого металла аналогично воздействию Ga на сталь, т.е. чрезвычайно сильно. Именно эти обстоятельства накладывают ограничения на температурные пределы использования ВК с Ga и Sn. Следует иметь в виду и тот факт, что сильное коррозионное повреждение большинства конструкционных материалов (исключая W) проявляется в случае появления признаков их смачивания Ga и Sn (при угле смачивания $\pi/2$).

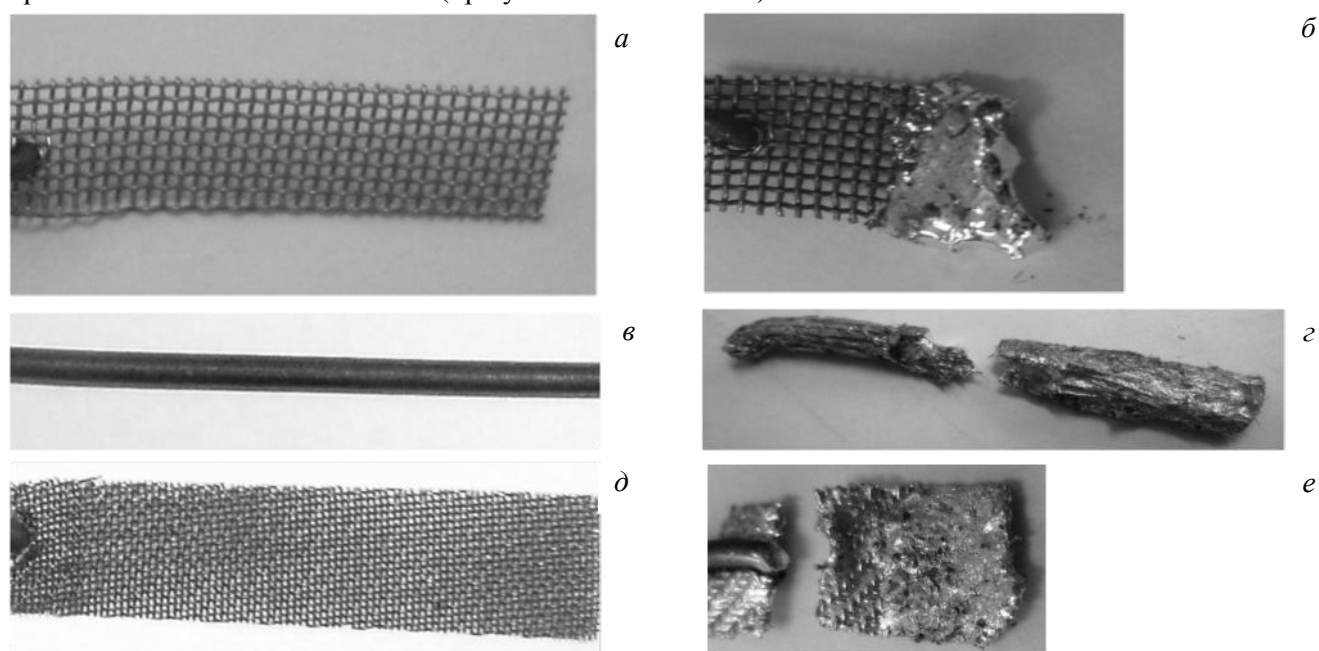


Рис. 4. Коррозионное воздействие Ga на конструкционные материалы при испытаниях в течение 1 ч при различной температуре: а, в, д — до, б, г, е — после испытаний; а, б — сталь X18H10T; 500 °С; в, г — ниобий; 700 °С; д, е — молибден, 700 °С

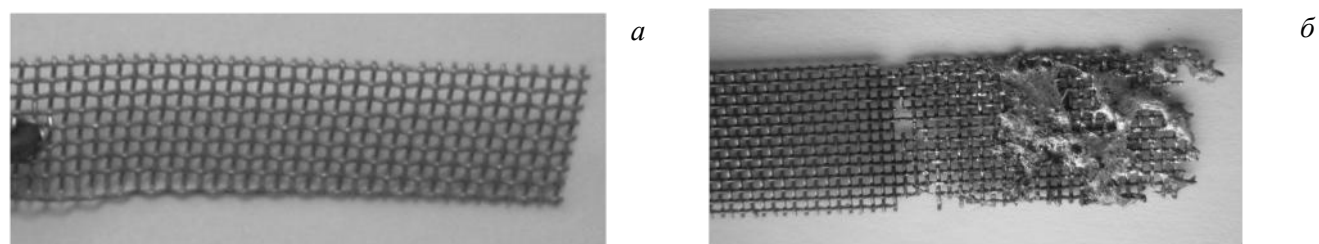


Рис. 5. Коррозионное воздействие Sn на сталь X18H10T при испытании в течение 1 ч при 600 °С: а, — до, б — после испытаний

Это обстоятельство особенно важно с точки зрения необходимости достижения смачивания твёрдых металлов, иначе идея использования КПС теряет смысл.

Влияние на механические свойства конструкционных материалов. Все рассматриваемые легкоплавкие металлы могут провоцировать охрупчивание конструкционных материалов ВК. ОЦК-металлы и сплавы, ферритно-мартенситные нержавеющие стали являются потенциально чувствительными к жидкометаллическому охрупчиванию в Sn, Li и Ga за счёт так называемого эффекта Ребиндера [13]. Кроме того, проникновение легкоплавких металлов в структуру твёрдого металла в процессе коррозионного воздействия может привести к деградации его механических свойств и разрушению — так называемый коррозионно-индуцированный эффект [1, 11]. Это особенно ярко наблюдалось в случае после испытания образцов Mo и V в Ga, когда за счёт интенсивного проникновения жидкого металла в твёрдые с образованием интерметаллических соединений (рис. 6, 7) эти металлы полностью утрачивали прочность и пластичность.

Этот эффект накладывает серьёзное ограничение на температурный предел использования конструкционных материалов в контакте с Ga и Sn. При использовании Li проблема совместимости с материалами конструкции ВК отсутствует [1, 10].

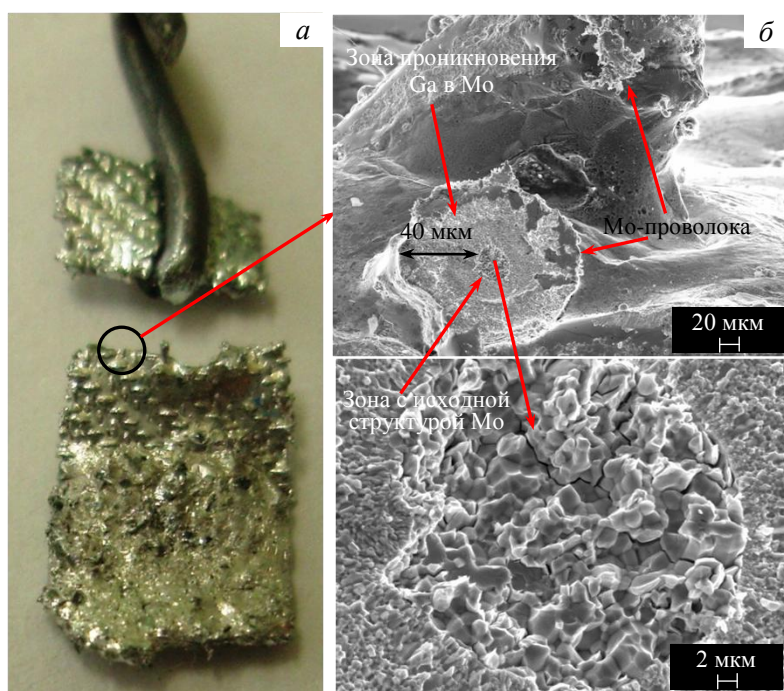


Рис. 6. Характер коррозионного воздействия Ga на Mo (700 °С, 1 ч): а — внешний вид образца; б — растровая электронная микрофотография места разрушения

Взаимодействие с изотопами водорода. Преимуществом Ga и Sn является то, что они не растворяют в себе и не взаимодействуют с водородом. В этом случае проблем с накоплением трития в камере токамака не возникает. Однако режима с пониженным рециклингом во-

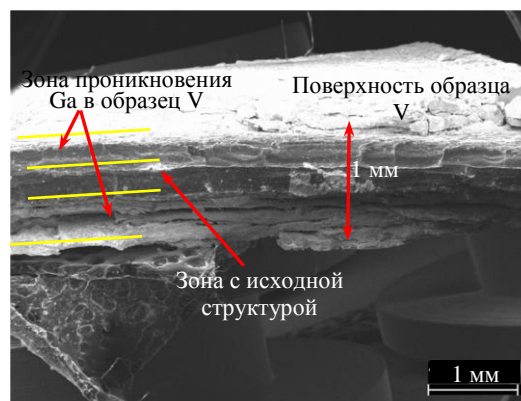


Рис. 7. Хрупкий излом образца V после испытания в Ga (700 °С, 1 ч), растровая электронная микрофотография излома

дородо реализовать в этом случае не удастся. Применение Li позволяет радикально снизить рециклинг, но требует разработки методов извлечения изотопов водорода и очистки внутренних поверхностей камеры токамака. Работы в этом направлении успешно ведутся на токамаке Т-11М [14, 15] и стеллараторе ТЖ-II [16]. Экспериментальные исследования термодесорбции водорода из расплава лития убедительно подтвердили отсутствие образования гидроксида лития в условиях его использования в токамаке. Имеющиеся экспериментальные данные (рис. 8) показали, что полная десорбция водорода, поглощённого литием, в отличие, например, от графита происходит при температуре не более 500—550 °С, т.е. при температуре, которую можно практически реализовать в технологическом процессе извлечения изотопов водорода из лития.

Таким образом, имеющиеся к настоящему времени результаты позволяют заключить, что захват водорода литием в условиях токамака не накладывает ограничений на его практическое применение в ТИН и ДЕМО.

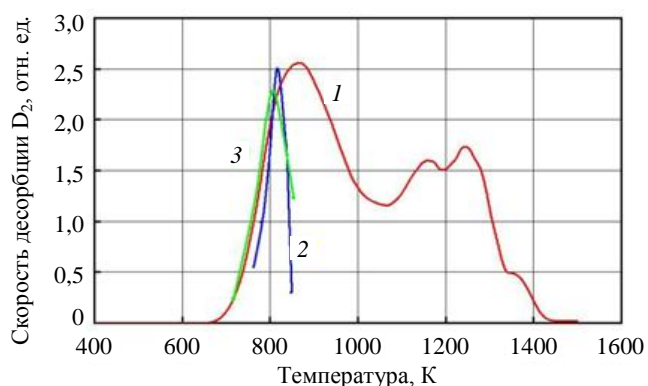


Рис. 8. Динамика десорбции дейтерия из С — 1 [17] и Li — 2 [18], 3 [19]

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВК НА ОСНОВЕ Ga, Sn, Li

Из приведённого рассмотрения видно, что верхний предел рабочей температуры ВК для всех рассматриваемых легкоплавких металлов близок к 550—600 °С. Для ВК с Li решающим фактором является ограничение по допустимому потоку атомов в плазму, с Ga и Sn — коррозионная стойкость конструкционных материалов. Для рассматриваемой конструкции ВК с использованием Li, Ga, Sn верхний предел тепловых нагрузок в стационарном режиме работы близок к 18—20 МВт/м². Использование других конструкционных материалов ВК повлечёт сужение окна допустимых рабочих параметров.

Выполненные оценки не учитывают возможный эффект возникновения защитного излучающего слоя испаренного под воздействием плазмы легкоплавкого металла над поверхностью ВК. Такой эффект наблюдается в экспериментах с литиевыми лимитерами в токамаках T11-M и FTU [4] и проявляется в снижении приблизительно на 50—70% величины теплового потока, достигающего поверхности ВК (рис. 9). Это означает, что для КПС с Li имеется потенциальная возможность расширения окна рабочих параметров. При использовании Ga и Sn защитный эффект практически будет отсутствовать из-за низкой величины давления паров этих металлов на верхней границе интервала рабочих температур, задаваемой ограничением по коррозионному повреждению конструкционных материалов. Это служит примером того, что отдельно взятое очевидное преимущество может обернуться существенным недостатком для использования этих металлов, если учитывать весь комплекс влияющих факторов.

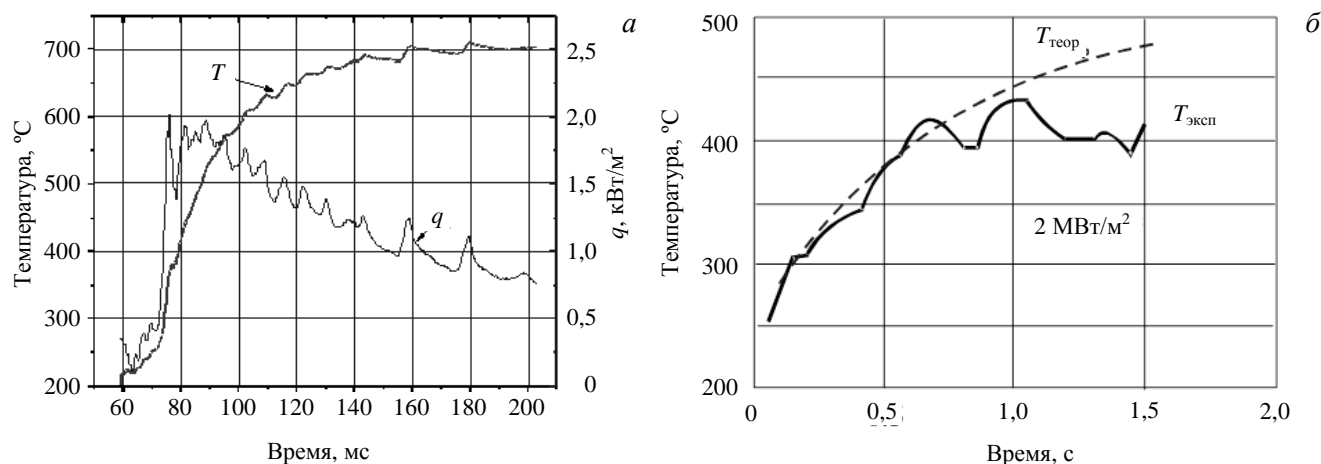


Рис. 9. Временная зависимость температуры поверхности T и рассчитанного потока тепла q для литиевого лимитера в разряде токамака T-11M (а), измеренной ($T_{\text{эксп}}$) и рассчитанной ($T_{\text{теор}}$) температуры поверхности литиевого лимитера токамака FTU (б)

При возникновении ЭЛМов и срывов на поверхность ВК приходят тепловые потоки, существенно превышающие приведённые величины для нормального плазменного разряда. Исходя из этого, Li имеет заметное преимущество перед Ga и Sn, обладая почти на порядок более высокой скрытой теплотой парообразования и обеспечивая эффективное охлаждение поверхности ВК за счёт испарения. Образование переизлучающего защитного слоя и в этих условиях эффективно снижает падающий на поверхность тепловой поток. В экспериментах на КСПУ и МК-200 [20] было показано, что более 90% приходящего потока энергии переизлучается в паровом слое над поверхностью литиевой мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проведённому расчётно-экспериментальному анализу, можно заключить, что использование КПС с литием для создания ВК имеет ряд преимуществ по сравнению с другими рассмотренными легкоплавкими металлами.

Несмотря на очевидное достоинство Ga и Sn по сравнению с Li, связанное с низким давлением пара над расплавом, их применение имеет ряд существенных недостатков. Высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам не позволяет увеличить верхний предел рабочих параметров ВК по сравнению с использованием Li. В некоторых случаях использование Ga и Sn может ока-

заться неприемлемым. Например, критическим моментом является необходимость обеспечения хорошего смачивания материалов КПС и ВК, без чего их использование с КПС теряет реальный смысл.

Кроме того, хорошая совместимость Li с плазмой токамака, подтвержденная наблюдением улучшения параметров плазмы в экспериментах на многочисленных плазменных установках [21—26], увеличивает привлекательность КПС с Li в качестве обращенного к плазме материала.

Обоснованный выбор легкоплавкого металла для применения в стационарных токамаках-реакторах требует продолжения экспериментальных исследований, разработки конструкции и технологии применения внутрикамерных элементов на основе КПС.

REFERENCES

1. **Mikhaylov V.N., Evtikhin V.A., Lyublinskiy I.E., Vertkov A.V., Chumanov A.N.** Lithium in fusion and space energetics of XXI century. — M.: Energoatomizdat, 1999. 528 p. (in Russian).
2. **Lyublinski I.E., Verkov A.V., Evtikhin V.A.** Application of lithium in systems of fusion reactors. 2. The issues of practical use of lithium in experimental facilities and fusion devices. — *Plasma Dev. and Operation*, 2009, vol. 17, pp. 265—285.
3. **Lyublinski I., Lazarev V., Mirnov S., Vertkov A., Scherbak A.** Lithium capillary-pore systems as solution of plasma facing materials problem for fusion reactors. — In: *Proc. of PSI 2014*. Kanazawa, Japan, May 26—30, 2014. — *J. Nucl. Mater.* (in press).
4. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** Lithium divertor concept and results of supporting experiments. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2002, vol. 44, № 6, pp. 955—977.
5. **Mirnov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V.** Liquid-metal tokamak divertors. — *J. Nucl. Mater.*, 1992, vol. 196—198, pp. 45—49.
6. **Mazzitelli G., Apicella M.L., Marinucci M. et al.** Status and Perspectives of the Liquid Material Experiments in FTU and ISTTOK. — *Fusion Energy 2008 (Proc. 22th Intern. Conf. Geneva, 2008)*. — Vienna: IAEA, 2008, CD-ROM file EX/P4-6.
7. **Lyublinski I.E., Verkov A.V., Evtikhin V.A. et al.** Application of lithium in systems of fusion reactors. 1. Physical and chemical properties of lithium. — *Plasma Devices and Operations*, 2009, vol. 17, pp. 42—72.
8. **Babichev P.A., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. et al.** Physical magnitudes. Reference book. Edited by Grigor'ev I.S., Melikhov E.Z. — M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (in Russian).
9. **Naydich Yu.V.** Contact phenomena in metallic melts. — Kiev: Naukova Dumka, 1972. 196 p. (in Russian).
10. **Lyublinskiy I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A.** Physical-chemical basis of lithium use in liquid metal systems of fusion reactor. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2007, issue 4, pp. 13—44 (in Russian).
11. **Yatsenko S.P.** Gallium, interaction with metals. — M.: Nauka (Science), 1974. 220 p. (in Russian).
12. **Blair H., Cook J., Hartman A.** Interaction of 304 SS with Lead-Tin and Lead-Free Solder. *Met316 Report*, May 11, 2001.
13. **Kamdar M.Kh.** Liquidmetal embrittlement. — In book: *Embrittlement of structural steels and alloys*. — M.: Metallurgiya (Metallurgy), 1988, pp. 333—423 (in Russian).
14. **Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T. et al.** Recent lithium experiments in tokamak T-11M. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, pp. 224—228.
15. **Mirnov S.V., Alekseev A.G., Belov A.M. et al.** Li collection experiments on T-11M and T-10 in framework of Li closed loop concept. — *Fus. Eng. and Des.*, 2012, vol. 87, pp. 1747—1754.
16. **Oyarzabal E., Martin-Rojo A.B., Tabares F.** Laboratory experiments of uptake and release of hydrogen isotopes in liquid lithium. — *PSI 2014*, Japan, Kanazava. — *J. Nucl. Mater.* (in press).
17. **Kovalenko D., Klimov N., Begrambekov L. et al.** Experimental investigations of erosion products of material bombardment by intensive plasma flows like ITER parameters. — In: *XXXIX Zvenigorod Intern. Conf. on Plasma Physics*. Feb. 6—10, 2012, p. 21.
18. **Baldwin M.J., Doerner R.P., Luckhard S.C., Conn R.W.** Deuterium retention in liquid lithium. — *Nucl. Fusion*, 2002, vol. 42, p. 1318.
19. **Furuyama Y.J.** Characteristic of lithium films. — *J. Nucl. Mater.*, 2003, vol. 313—316, p. 288.
20. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** Protective properties of the receiving plates of divertor on the base of lithium capillar-porous systems. — *J. of Advanced Materials*, 2000, vol. 5, № 2, p. 41—49.
21. **Mansfield D., Johanson D.W., Grek B. et al.** Observation concerning of injection of a lithium aerosol into the edge of

- TFTR discharges. — Nucl. Fusion, 2001, vol. 41, p. 1823.
22. **Vershkov V.A., Mirnov S.V., Lyublinski I.E. et al.** Experiments with lithium gettering of the T-10 tokamak. — Fusion Energy, 2008 (Proc. 22th Intern. Conf. Geneva, 2008). — Vienna: IAEA, 2008, CD-ROM file EX/P4-14.
23. **Majeski R., Kaita R., Boar M. et al.** Liquid lithium limiter in CDX-U. — Fusion Eng. Des., 2004, vol. 72, pp. 121—132.
24. **Apicella M.L., Mazzitelli G., Percoli Ridolfini V. et al.** Review of FTU results with the liquid lithium limiter. — Fusion Eng. Des., 2010, vol. 85, pp. 896—901.
25. **Kaita R., Kugel H., Dell M.G. et al.** Plasma performance improvement with lithium-coated plasma-facing components in NSTX. — Fusion Energy, 2008 (Proc. 22th Intern. Conf. Geneva, 2008). — Vienna: IAEA, 2008, CD-ROM file EX/P4-9.
26. **Tabàres F., Tafalla D., Ferreira J. et al.** Lithium wall stellarator experiment in TJ-II. — Plasma and Fusion Research, 2010, vol. 5, S1012.

AUTHORS

Lyublinski I.E. Public JSC «Red Star», Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; lyublinski@yandex.ru.

Vertkov A.V. Public JSC «Red Star», Elektrolitnyi proezd 1a, 115230 Moscow, Russia; avertkov@yandex.ru

Semenov V.V. Public JSC «Red Star», Elektrolitnyi proezd 1a, 115230 Moscow, Russia; darkfenix2006@mail.ru

Received 15 October 2014
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 1, pp. 7—14.