

СМАЧИВАЕМОСТЬ РЕАКТОРНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т ОКОЛОЭВТЕКТИЧЕСКИМИ РАСПЛАВАМИ ЛИТИЯ НА ОСНОВЕ ОЛОВА

Алчагиров Б.Б., Канаметова О.Х., Дышекова Ф.Ф.
(ФГБОУ ВО «КБГУ им. Х.М. Бербекова», Нальчик, Россия)

Введение

Изучение поведения жидкостей на твердых поверхностях представляет большой интерес в связи с широкой распространенностью явления смачивания и растекания в природе, они лежат в основе процессов создания композиционных материалов, в частности, анодов с литиевой матрицей для аккумуляторов, совершенствования технологии пайки и пропитки, а также во многих других областях. Смачиваемость жидкими металлами поверхностей тугоплавких металлов, в частности литием и его сплавами с оловом, вызывают повышенный научный и технологический интерес, поскольку они обладают удачным набором физико-химических свойств, который делает их привлекательными для использования в качестве жидкометаллического компонента в токамаках и капиллярно-пористых системах [1–8]. С другой стороны, выбор облицовочных тугоплавких материалов для токамаков, которые должны находиться в непосредственном контакте с плазмой, т.е. способных выдерживать повышенные температуры, является одной из острых проблем для развития термоядерной энергетики, рис. 1.

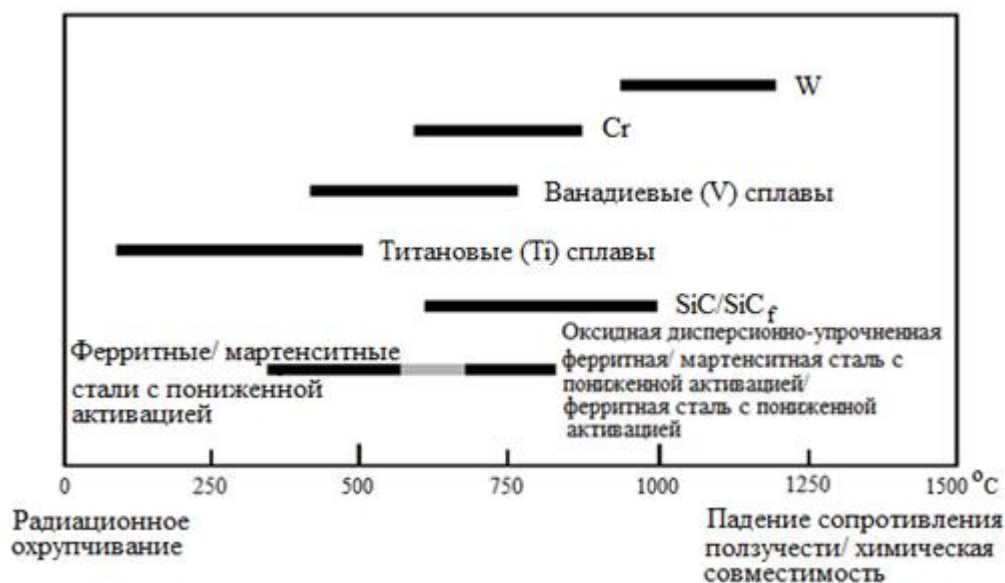


Рис. 1. Температурные «окна» для основных конструкционных материалов – кандидатов для применений в термоядерных энергетических реакторах

По сравнению с чистым жидким литием, с которого началась реализация идеи использования жидких металлов при проектировании внутрикамерных компонентов токамака, сплавы системы Li–Sn характеризуются более низкими значениями давления пара (примерно на три порядка ниже, чем у лития [9]). Это может позволить повысить максимально допустимую температуру при эксплуатации сплавов Li–Sn в термоядерных реакторах в условиях непосредственного воздействия удерживаемой в них плазмы. Сплав олова с содержанием около 15–20 ат. % лития в олове имеет примерно такую же химическую активность, что и известный пожаробезопасный теплоноситель Pb-17Li – немаловажный фактор в пользу возможного выбора данного сплава для ядерных

энергетических установок. По этим причинам сплавы лития с оловом могут стать альтернативой чистому литию, хотя существуют обстоятельства, требующие еще дополнительных исследований для обоснования возможности применения этих сплавов в ядерной энергетике. В частности, одной из таких проблем является агрессивность жидкого олова и его литийсодержащих сплавов при применении их в области высоких температур, существенно превышающие температуру плавления жидких сплавов Li–Sn, поскольку они начинают реагировать с некоторыми сталями с образованием интерметаллидов (FeSn_2 и FeSn) [10], приводящие к эрозии поверхностей защитных пластин и необходимости их периодическим заменам на новые.

Вместе с тем олово-литиевые сплавы в жидком состоянии изучены намного меньше, чем их чистые компоненты. Особенно это касается проблем смачиваемости сплавами лития поверхностей объектов, рассматриваемых в настоящей работе, для которых должна быть обеспечена надежная и равномерная смачиваемость в статических и, особенно, в динамических условиях проточно-пленочного течения в жидком лимитере токамаков (тороидальные камеры с магнитными катушками). Они предназначены для удержания в вакуумной камере плазменного шнура магнитными полями для достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза, поскольку обращенные к плазме внутренние поверхности камер токамаков, изготовленные из тугоплавких металлов (нержавеющие стали, вольфрам, молибден и др.), не способны без дополнительной защиты выдерживать необходимые (по продолжительности времени) условия для протекания термоядерных реакций высокие температуры и мощные излучения [8,11–13]. Из этого следует, что без детального изучения и понимания физики и химии межфазного взаимодействия жидких металлов на границах с поверхностями различных материалов, имеющее место при смачиваемости и характеризующаяся краевым углом между жидким металлом и смачиваемой поверхностью, невозможно решение актуальной проблемы успешного использования лития и его сплавов с оловом в различных термоядерных устройствах в качестве защитного покрытия поверхностей материалов первой стенки ЯЭУ.

Действительно, смачиваемость (или краевые углы смачивания θ) являются эффективными методами изучения процессов, происходящих на межфазных границах, так представляются одними из наиболее чувствительных характеристик свойств и состояния поверхностей материалов. Они дают информацию, позволяющую устанавливать механизмы явлений и процессов, протекающих на межфазных границах, а также характер взаимодействия жидкометаллических теплоносителей со стенками теплообменников и тепловых труб, а также тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных энергетических установок и др. [14–16].

В настоящее время ставится задача поиска путей и методов устранения отмеченных выше недостатков чистых жидких олова и лития с одновременным сохранением всех преимуществ каждого из них в сплавах олово-литий для их использования в качестве жидко-пленочного и непрерывно-обновляемого текучего покрытия ими облицовочных тугоплавких материалов для защиты первой стенки ядерных реакторов от воздействия плазмы, нейтронного и других видов излучений.

1. Методика эксперимента

Измерения температурных зависимостей краевых углов смачивания $\theta(T)$ поверхности конструкционной стали 12X18H10T расплавами олова и его сплава с литием ($\text{Sn}+15$ ат. % Li) ($\text{Sn}_{85}\text{Li}_{15}$), проводились нами методом лежащей капли на автоматизированной экспериментальной установке [17] с погрешностью, не превышающей 1–1,5 угловых градуса. Для приготовления сплава использованы литий

технической чистоты (99,98 %) и олово марки ОВЧ (99,9999 %). Поверхности стальных подложек шлифовались и полировались по стандартной технологии с использованием паст ГОИ.

Перед началом измерений температурной зависимости углов смачивания $\theta(T)$ измерительная ячейка и подложки, размещенные и отъюстированные внутри стальной водоохлаждаемой вакуумной камеры (рис. 2 и 3), подвергались предварительной раздельной дегазации в условиях вакуума $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па и температурах $\sim 1200\text{--}1300$ К, превышающие на 100 К и более ожидаемые максимальные температуры измерений $\theta(T)$.

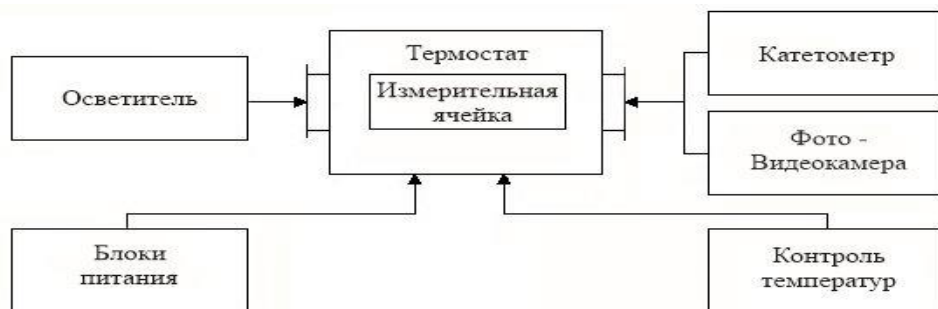


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для изучения температурной зависимости поверхностного натяжения жидких металлов и сплавов методом большой лежащей капли

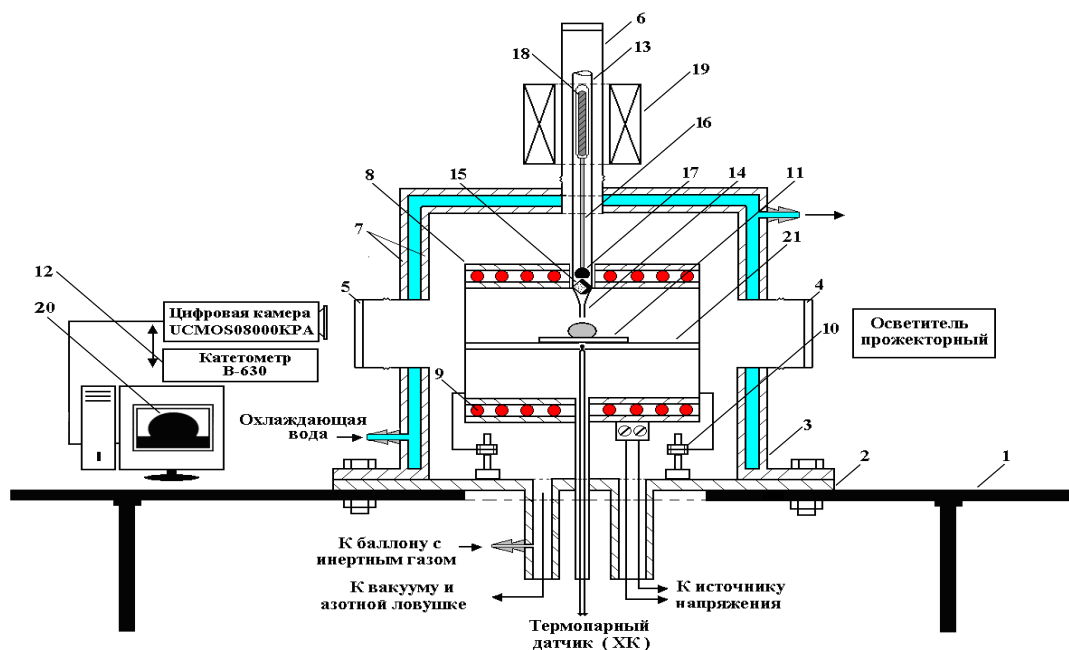


Рис. 3. Экспериментальная установка для изучения смачиваемости поверхностей твердых тел жидкометаллическими расплавами:

1 – массивный стол, 2 – стальная плита для вакуумного колпака 3; 4–6 – плоские оптические окна; 7 – водоохлаждаемая «рубашка»; 8 – высокотемпературная печь; 9 – молибденовый и/или танталовый ленточный нагреватель; 10 – регулируемые по высоте стойки-ножки печи; 11 – исследуемая полированная подложка; 12 – катетометр В-630 для юстировки подложки; 13 – заправочный бункер; 14 – кончик капилляра; 15 – исследуемый образец; 16 – шток-затвор; 17 – шаровой кончик штока; 18 – металлический стержень в вакуумированной стеклянной «рубашке»; 19 – электромагнит; 20 – видеоизображение исследуемой капли металлического расплава; 21 – керамическая пластина для размещения стальной подложки с исследуемой каплей и юстировки системы «подложка-капля» [17]

Использованная нами методика и процедура подготовки исследуемых образцов обеспечивает снятие механических напряжений, которые могли возникнуть в процессе шлифовки и полировки поверхностей подложек. Температура образцов измерялась электронным милливольтметром и дифференциальной термопарой ХА (хромель-алюмель), позволившие контролировать температуру подложки с каплей расплава с точностью $\pm 0,2$ °С. Термовакуумная обработка жидкометаллических образцов проводилась отдельно от подложек с помощью автономных нагревателей. После завершения процедуры термообработки и последующего понижения температуры расплавов до температуры, немногим более ликвидусной или температур плавления (в случае чистых металлов до $T_{пл} + 5$ °С), жидкие металлы и сплавы подвергались фильтрации через тонкие (не более 0,5 мм) капилляры и только после этого приводились в непосредственный контакт с исследуемой подложкой.

2. Результаты измерений и их обсуждение

2.1. Система «сталь 12Х18Н10Т – олово»

Температурная зависимость краевых углов смачивания $\theta(T)$ поверхности стали 12Х18Н10Т жидким оловом изучена в интервале от 533 К до 923 К. Несколько фотографий профиля капли жидкого олова, лежащей на подложке из стали 12Х18Н10Т при различных температурах, использованные для последующего определения краевых углов смачиваемости $\theta(T)$, показаны на рис. 4.

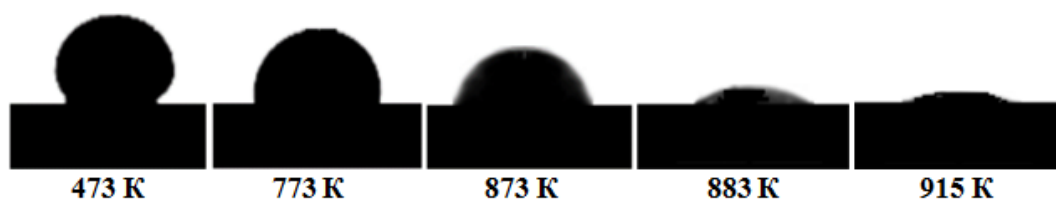


Рис. 4. Видеоизображения профилей капли жидкого олова, лежащей на подложке из стали 12Х18Н10Т при различных температурах

Полученные после обмера фотографии и математической обработки данные о температурной зависимости краевых углов $\theta(T)$ поверхности стали 12Х18Н10Т жидкими оловом графически представлены на рис. 5.

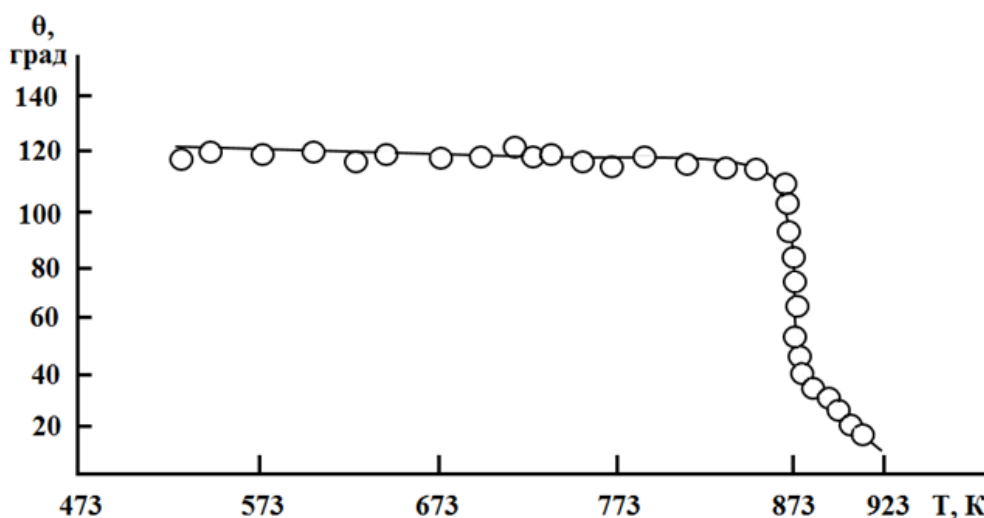


Рис. 5. Температурная зависимость краевых углов смачивания жидким оловом поверхности стали 12Х18Н10Т

Как видно на рис. 5, в области температур от 533 до 853 К наблюдается монотонное уменьшение углов смачивания от 120° до 110° , которое происходит по линейному закону. Дальнейшее повышение температуры до 860 К приводит к резкому уменьшению значений углов смачивания от 100° до 40° и далее – почти до нулевых значений $\theta(T)$. Таким образом, на температурной зависимости смачиваемости жидким оловом поверхности стали 12X18H10T нами обнаружена заметно выраженная критическая температура смачиваемости (КТС), равная 870 К.

В работе [11] имеется информация о том, что при температурах выше 870 К содержащиеся в конструкционных материалах легирующие элементы начинают растворяться в жидком литии и олове (рис. 6). А это означает, что определенная нами критическая температура смачиваемости оловом поверхности стали 12X18H10T (при 873 К) фактически совпадает с началом растворимости олова с материалом подложки, табл. 1. Поэтому считаем разумным предположить, что критическая температура смачиваемости КТС связана с началом процесса заметного растворения легирующих элементов стали 12X18H10T в олове. Предположение авторов [11] о том, что углы смачиваемости θ конструкционных сталей жидким оловом считаются примерно равными $\sim 30^\circ - 40^\circ$, по нашему мнению, требует уточнения (при каких температурах и к каким маркам стали это относится и т.п.), поскольку в [11] не указаны источники информации о $\theta(T)$ олова.

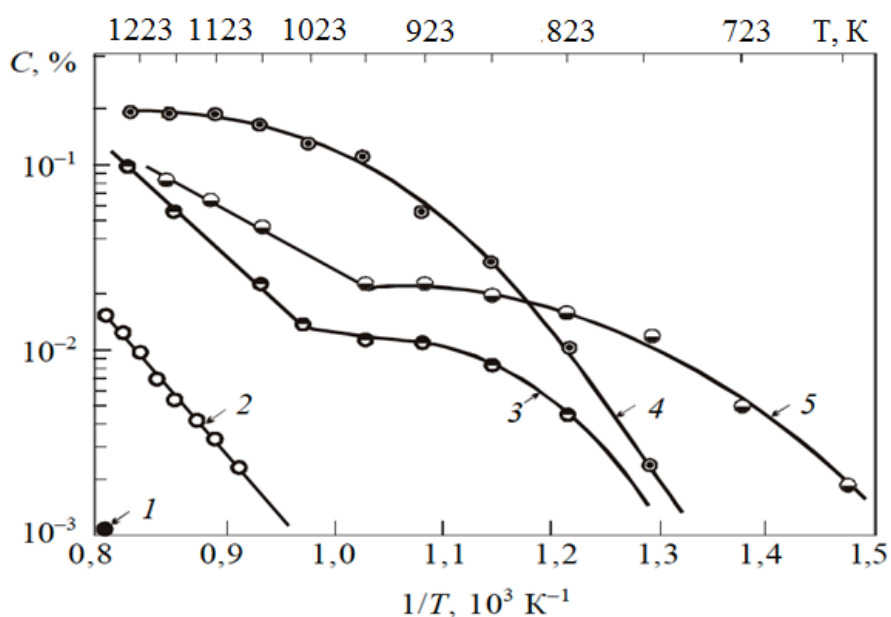


Рис. 6. Растворимость компонентов стали 12X18H10T в литии:
1 – Fe; 2, 4 – Cr; 3, 5 – Ni; 1, 2, 3 – литий высокой чистоты;
4, 5 – литий с 0,5% примеси азота

В пользу существования связи между критической температурой (КТС) и началом взаимодействия контактирующей пары на межфазовой границе «жидкий металл – подложка» могут свидетельствовать также полученные нами результаты изучения температурной зависимости углов смачивания $\theta(T)$ жидким сплавом Sn+15 ат. % Li поверхности титана, в которой отсутствует сколь-нибудь заметно выраженная критическая температура смачиваемости [18], рис. 7.

Таблица 1

**Экспериментально установленные температурные границы совместимости
конструкционных материалов с жидкими металлами [11]**

Жидкий металл	Конструкционный материал	Температурный предел, °С
Литий	Ферритные и ферромагнитные стали	800
	Аустенитные стали	700
	Ванадиевые сплавы	900
	Молибденовые сплавы	1200
	Вольфрамовые сплавы	1500
	Угол смачивания $\theta \sim 0$	
Олово	Растворение большинства конструкционных материалов при смачивании – $T > 600\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	Сплавы Мо и W совместимы с жидким оловом при $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Угол смачивания $\theta \sim 30 - 40^{\circ}$	
Сплав Li—Sn	Температурный предел совместимости большинства конструкционных материалов ниже, чем для чистого олова	
	Сплавы Мо и W совместимы с жидким сплавом LiSn при $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Угол смачивания $\theta \sim ?$ (возможно, $< 30^{\circ}$)	

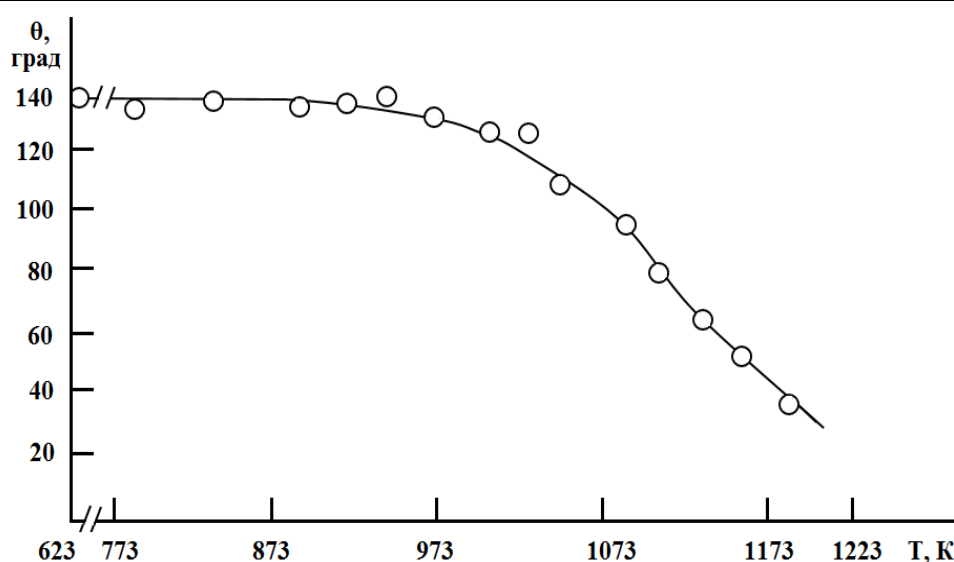


Рис. 7. Температурная зависимость угла смачивания $\theta(T)$ поверхности титана жидким сплавом Sn+15 ат. % Li [18]

Действительно, отсутствие КТС в системе «Sn+15 ат. % Li – титан» в сравнении с системой «сталь 12X18H10T – жидкое олово», по нашему мнению, можно объяснить тем, что у титановой подложки более высокая температура плавления, чем у стали 12X18H10T, а также существенно меньше взаимная растворимость жидкого сплава Sn+15 ат. % Li с материалом подложки. Заметим, что максимальная растворимость олова в титане составляет $10^{-16}\text{ }(\text{ат.})$ при эвтектической температуре. Влияние же титана (Ti) на температуру плавления олова пока точно не установлено [19].

2.2. Система «сталь 12X18H10T – расплав Sn +15 ат. % Li»

Измерение температурной зависимости $\theta(T)$ поверхности стали 12X18H10T жидким сплавом Sn+15 ат. % Li осуществлялось нами интервале температур от 573 К до 1100 К (рис. 8). После начала заметного, а затем и интенсивного уменьшения $\theta(T)$ по мере

повышения температуры, видеофиксация профиля капли исследуемого сплава продолжалось в непрерывном режиме. Подчеркнем, что при этом температура системы «жидкая капля–твердая подложка» оставалась практически постоянной, а процесс интенсивного уменьшения угла $\theta(T)$ продолжался в течение короткого периода времени – несколько минут. Как видно на рис. 8, краевой угол смачивания θ поверхности стали 12X18H10T жидким расплавом Sn+15 ат. % Li в самом начале измерений при $T = 673$ К составил около 140° , который в течение первого часа монотонно уменьшался по линейному закону, достигнув значения $\theta = 130^\circ$ при температуре ~ 1033 К. Дальнейшее повышение температуры привело к достаточно резкому уменьшению угла смачивания θ , которое в течение нескольких минут завершилось смачиванием поверхности стальной подложки 12X18H10T. Таким образом, в системе «сталь 12X18H10T – расплав Sn+15 ат. % Li» нами обнаружена критическая температура смачивания (КТС), которая составила около 1050 К.

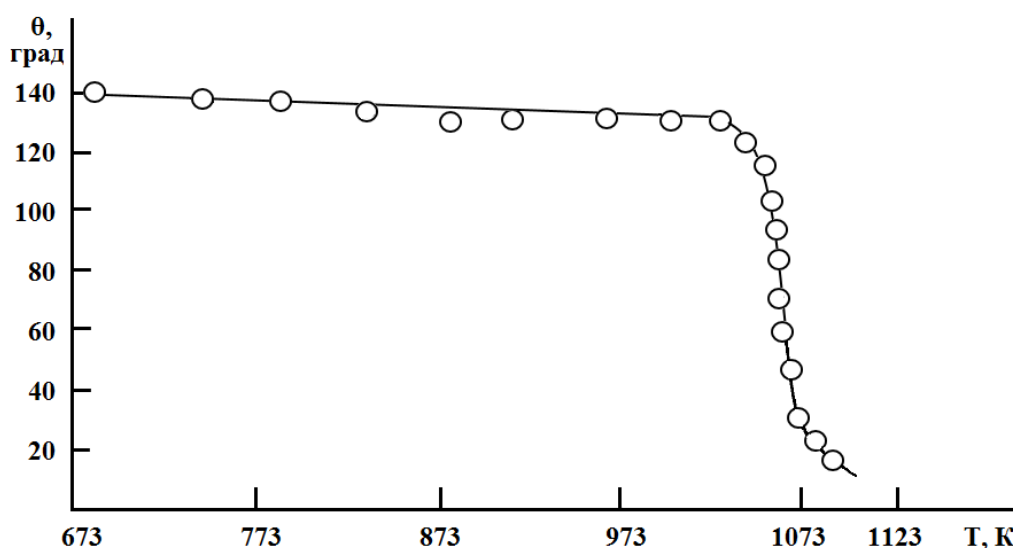


Рис. 8. Температурная зависимость краевых углов смачивания поверхности стали 12X18H10T жидким сплавом Sn+15 ат. % Li

Представляет интерес сравнение наших результатов с литературными данными о смачиваемости стали 12X18H10T жидкими сплавами олова с литием, но с содержанием в два раза больше лития (за отсутствием в литературе других опытных данных), чем в изученном авторами [12] сплаве состава Sn70Li30, рис. 9. Действительно, сравниваемые данные $\theta(T)$ существенно разнятся: в [12] температурный порог смачивания составил 630 К против ~ 1050 К – у нас, а по абсолютным величинам краевые углы $\theta(T)$ составили, соответственно, 90° – против $\sim 140^\circ$ – в настоящей работе.

Но при обсуждении причин несовпадения наших результатов изучения $\theta(T)$ с данными [12] необходимо также подчеркнуть, что стали марок 12X18H10T и 316 SS, из которых изготовлены наши подложки и использованные авторами [12], различаются по составам содержащихся в них легирующих элементов, особенно по содержанию никеля (на 7 %) и молибдена (на 2–3%), табл. 2.

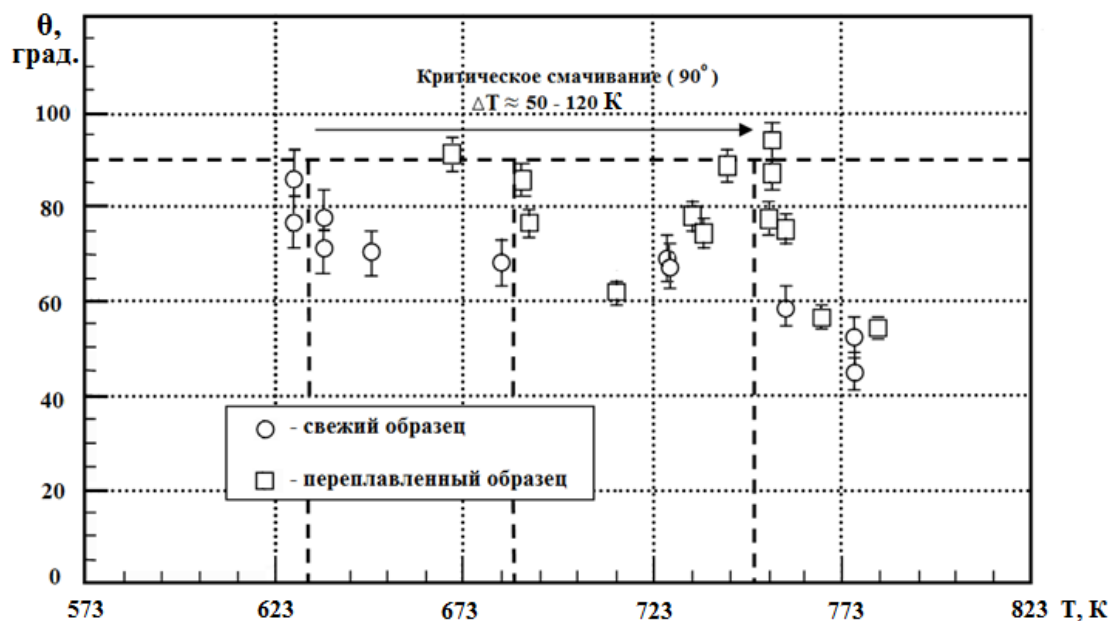


Рис.9. Температурная зависимость смачиваемости жидким сплавом $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ поверхности стали 316 SS [11]. Здесь горизонтальной пунктирной линией отмечены температуры начала смачиваемости (т.е. пороги смачивания, когда по величине контактные углы смачиваемости $\theta(T)$ становятся меньше 90°), а вертикальными – соответствующие им температуры для свежего и переплавленного образцов жидкого сплава $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$

Таблица 2

Химический состав сталей, использованных для изучения смачиваемости в данной работе и в [12]

Марка стали	Химический состав сталей, % (остальное железо)									
	C	Si	Mn	S	Mo	Cr	Ni	Ti	Cu	P
SS 316 (аналог AISI 316)	< 0,08	< 1,0	< 2,0	0,03	2,0– 3,0	16,0– 18,0	16,0– 18,0			0,044
12X18H10T	Не более 0,12	Не более 0,8	Не более 2,0	Не более 0,02	–	17,0– 19,0	9,0 – 11,0	0,6– 0,8	Не более 0,3	Не более 0,035

Во-вторых, по признанию авторов [12], «...однако загрязнение сплава, по-видимому, сильно влияло на характеристики смачивания материалов, понижая существенно их температуру смачивания в наихудших наблюдаемых случаях». После окончания опытов авторами [12] были проведены анализы с использованием ряда современных методов диагностики профиля состава подложек по глубине с помощью масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS), а также изучена межфазная граница между подложками и сплавом $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ сканирующей электронной, рентгеновской и 3D-лазерной микроскопии. Они показали, что первые признаки коррозии, вызванные кластерами «литий-хром» и интерметаллической смесью «железо-олово», появились на нержавеющей стали 316 после трехчасового воздействия на него жидким сплавом $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ при температурах 823 К. И, наоборот, молибден и вольфрам – отсутствие взаимодействия со сплавом $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ в эквивалентных условиях (рис. 10 и 11).

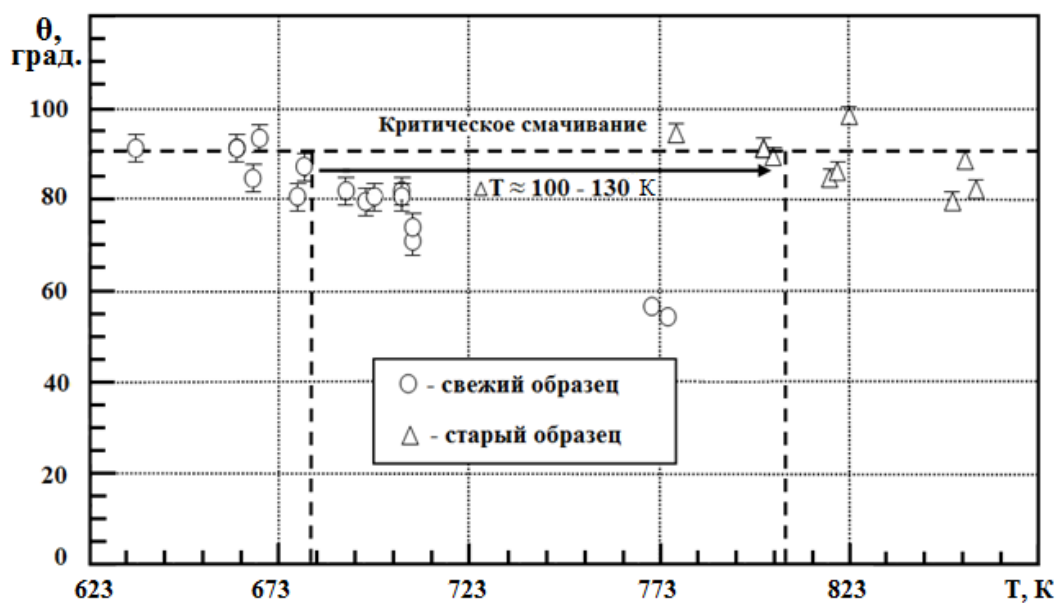


Рис. 10. Экспериментальные данные температурной зависимости краевых углов смачивания поверхности вольфрамовой подложки [12]

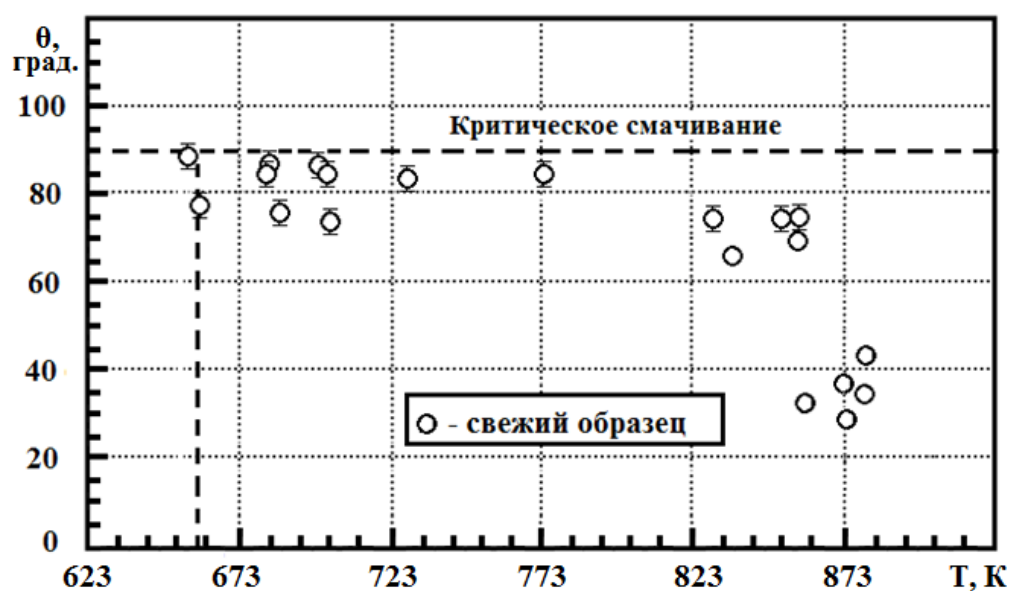


Рис. 11. Экспериментальные данные температурной зависимости краевых углов смачивания капель $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ поверхности молибденовой подложки [12]

В-третьих, и это главное, возникают сомнения по поводу надежности методики и технологии экспериментов, использованных в [12], поскольку через несколько секунд после начала опытов из исследуемой капли расплава $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ произошел внезапный выброс пузырька газа, отчетливо прослеживаемый на видеокдрах, снятых за первые 15 с после начала опытов, рис. 12.

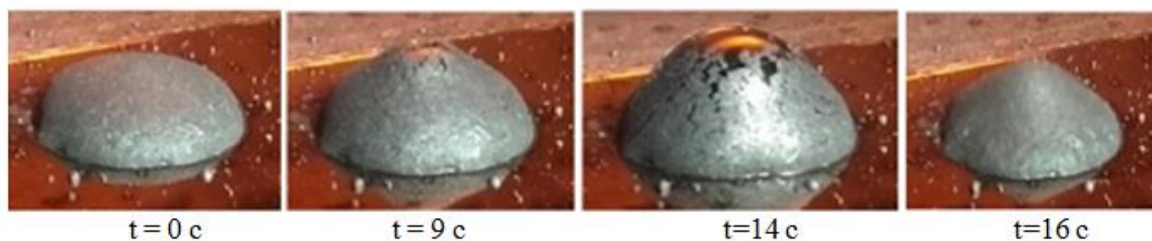


Рис. 12. Фотоизображения лежащей на поверхности стали марки 316 SS капли расплава $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ в зависимости от времени ее «старения» (t – секунды) при измерениях краевых углов смачиваемости $\theta(t)$

Судя по серии изображений одной и той же капли расплава $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$ в зависимости от хронологии ее старения [12], обращает на себя особое внимание состояние вершины капли за период времени с 9-й по 15-ю секунды. Видимо, не исключено, что имело место окисление поверхности жидкой капли $\text{Sn}_{70}\text{Li}_{30}$, о чем свидетельствует «расступившаяся» на несколько секунд пленка оксидов и обнажившая в момент выброса газового пузырька из капли вершинную часть зеркально-чистой поверхности капли. Заметим, что на 16-й секунде (т.е. в течение одной сек.) вершина капли опять покрылась полностью оксидной пленкой. Подтверждением нашего предположения могут служить результаты работ [16, 20], в которых изучалось влияние атмосферного кислорода на поверхностное натяжение и смачиваемость жидкой капли, на которых показаны, как выглядит в начале и конце опытов после экспонирования в активной газовой среде профиль капли эвтектического сплава $\text{Pb}_{44,6}\text{Bi}_{55,4}$ и, особенно, ее вершина, рис. 4 и 13.

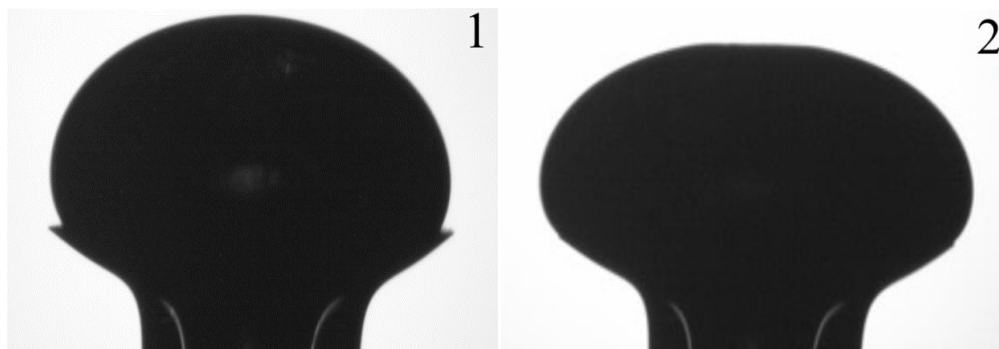


Рис. 13. Неокисленная капля 1 эвтектического сплава $\text{Pb}_{44,6}\text{Bi}_{55,4}$ в начале опытов и та же самая (но изображенная теперь справа) капля, после окисления около 30 мин. в атмосфере воздуха с появившейся на ее вершине плоской оксидной пленкой – «полочкой» [20]

В работе [20], с целью более корректного и точного определения степени влияния газовой среды на поверхностное натяжение (ПН) эвтектического расплава PbBi , измерения ПН были осуществлены последовательно и в безостановочном режиме на одной и той же поверхности капли $\text{Pb}_{44,6}\text{Bi}_{55,4}$ в высоком вакууме и среде атмосферного воздуха. Авторами [20] было показано, что по мере экспозиции расплава $\text{Pb}_{44,6}\text{Bi}_{55,4}$ в кислороде атмосферного воздуха при температуре расплава 555 К, оксиды на поверхности капли расплава $\text{Pb}_{44,6}\text{Bi}_{55,4}$ начинали скапливаться на ее вершине, образуя горизонтальную площадку («полочку»), хорошо видимую невооруженным глазом (на рис. 13 – правая капля 2), протяженность которой по мере продолжения экспозиции расплава в атмосфере воздуха увеличивалась. При этом, если в условиях статического вакуума поверхностное натяжение расплава $\text{Pb}_{44,6}\text{Bi}_{55,4}$ составило 400 ± 5 мН/м, то за первые несколько десятков секунд после начала экспозиции капли в атмосфере воздуха давлением около 300 мм. рт. ст., поверхностное

натяжение расплава $Pb_{44,6}Bi_{55,4}$ понизилось на 40 мН/м, а через 10 мин – на 55 мН/м, т. е. на 15 % и более, что значительно превышает суммарную погрешность (1,5%) измерений ПН, присутствующих в соотношении Юнга и напрямую определяющую степень смачиваемости.

Имеется и другой немаловажный фактор, также существенно влияющий на характер температурных и концентрационных зависимостей ПН сплавов «олово-литий». Он обусловлен наличием в используемых исследователями в экспериментах, казалось бы, достаточно чистых образцах лития (99,98% Li) растворенного в них кислорода, достаточно четко обнаруживаемого современными электронно-спектроскопическими методами анализа [21,22], рис. 14.

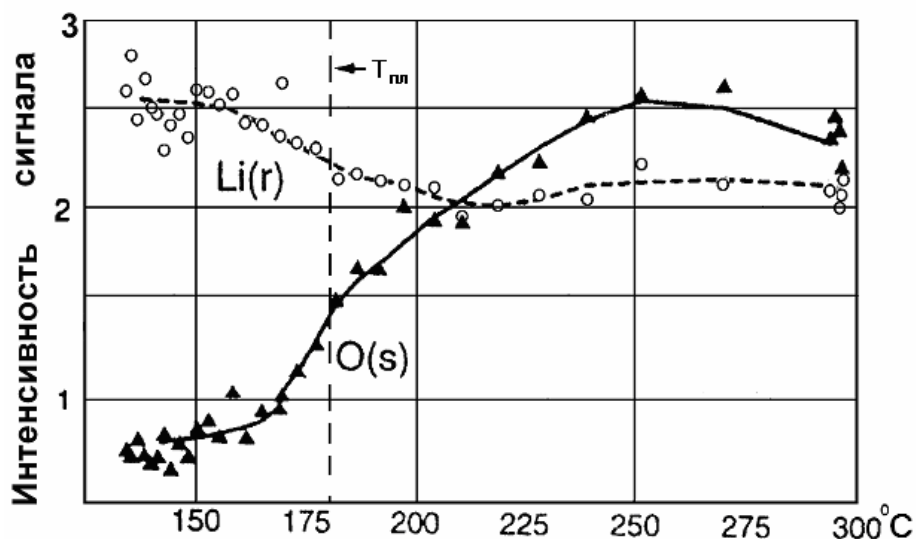


Рис. 14. Температурная зависимость интенсивности сигнала от степени содержания кислорода на поверхности образца Li чистой 99,9%; (зондирующий пучок He^+ с энергией 500 эВ), полученная методом низкоэнергетической ионно-отражательной спектроскопией [21, 22]

Интересно отметить (рис. 14), что процесс сегрегации и выхода кислорода на поверхность лития зависит температуры и усиливается с ее повышением. В результате содержание кислорода на поверхности жидкого лития оказывается заметно выше, чем в твердом состоянии, о чем и свидетельствуют данные [21, 22]. Более того, присутствие кислорода на поверхности лития возрастает почти в два раза при повышении температуры от 433 до 533 К и лишь дальнейшее повышение температуры приводит к некоторой стабилизации содержания кислорода на поверхности лития.

Положение при этом осложняется тем, что при температурах опытов по изучению смачиваемости, когда Li и его сплавы должны находиться в жидком состоянии, т. е. температурах, заведомо превышающих температуру плавления Li, а для его сплавов – и ликвидусные температуры (550–600 К), практически в этом же интервале температур содержание кислорода в литии достигает максимальных значений [21]. Наличие отмеченного фактора, содействующего обогащению поверхности лития и его сплавов кислородом или другими высокоактивными газовыми примесями, обычно приводящие к понижению и/или изменению ПН [23, 24], необходимо учитывать должным образом, особенно при термовакuumной обработке исследуемых образцов с участием высокоактивных щелочных металлов [25] и добиваться обеспечивать тщательную подготовку экспериментов при изучении столь чувствительной поверхностной характеристики вещества, как смачиваемость.

Заключение

1. Установлено наличие критической температуры смачиваемости жидким оловом поверхности стали 12X18H10T, которая равна 873 К.

2. В системе «сталь 12X18H10T – расплав Sn+15 ат. % Li» обнаружена критическая температура смачивания (1053 К), при которой краевой угол смачивания начинает резко уменьшаться от 130 до 90 угловых градусов.

3. Полученные результаты проанализированы и им даны соответствующие интерпретации и объяснения. По мнению авторов, обнаруженные в работе критические температуры смачиваемости на зависимости $\theta(T)$ в основном обусловлены и связаны с началом процессов интенсивного растворения легирующих элементов в стали 12X18H10T с жидкими оловом и его сплавом с литием.

4. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области исследования смачиваемости и адгезионного взаимодействия в системах «поверхность твердого тела – смачивающая жидкость», многие процессы до сих пор изучены недостаточно полно, а некоторые фундаментальные проблемы капиллярности начинают решаться лишь в настоящее время.

Список литературы

1. Красин В.П., Союстова С.И. Термодинамические параметры сплавов литий–олово, важные с точки зрения их использования в токамаках // ТВТ. 2019. Т. 57. No 2. С. 212–220.

2. Weeks J.R. Lead, Bismuth, Tin, and Their Alloys as Nuclear Coolants // Nucl. Eng. Des. 1971. V. 15. P. 363.

3. Baluc N. Materials for fusion power reactors // Plasma physics and controlled fusion. 2006. V. 48. №. 12B. P. B165–B177.

4. Fütterer M.A., et al. On the Use of Tin–Lithium Alloys as Breeder Material for Blankets of Fusion Power Plants // J. Nucl. Mater. 2000. V. 283. P. 1375–1379.

5. Loureiro J. P. S., et al. Behavior of liquid Li-Sn alloy as plasma facing material on ISTTOK // Fusion Engineering and Design. 2017. V. 117. P. 208–211.

6. Marmur A., et al. Contact angles and wettability: Towards common and accurate terminology // Surface Innovations. 2017. V. 5. №. 1. P. 3–8.

7. Vertkov A. et al. Liquid tin limiter for FTU tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2017. – V. 117. P. 130–134.

8. Красин В. П., Союстова С.И. Термодинамическая оценка стабильности металлических и керамических материалов в бинарном расплаве Sn–20% Li // ТВТ. (2020). Том 58. No 3. с. 365–375.

9. Sharafat S., Ghoniem N. Summary of thermo-physical properties of Sn and compounds of Sn-H, Sn-O, Sn-C, Sn-Li, and Sn-Si and comparison of properties of Sn, Sn-Li, Li, and Pb-Li // Report SS/NG: UCLA-UCMER-00-31 (UCLA, 2000). – 2000. 57 p.

10. Yin F. et al. Thermodynamic assessment of the Li–Sn (lithium–tin) system // Journal of alloys and compounds. 2005. V. 393. №. 1-2. – P. 105–108.

11. Вертков А.В., Люблинский И.Е. Опыт разработки жидкометаллических элементов, обращенных к плазме стационарного токамака (Обзор) // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. V. 40. №. 3. P. 5–13.

12. de Castro A., et al. Exploration of Sn70Li30 alloy as possible material for flowing liquid metal plasma facing components // Nuclear Materials and Energy. 2020. V. 25. P. 100829.

13. Kondo M., Nakajima Y. Boiling points of liquid breeders for fusion blankets // Fusion Engineering and Design. 2013. V. 88. №. 9-10. P. 2556-2559.

14. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. 232 с.
15. Емельяненко А.М. Смачиваемость межфазных границ как индикатор их свойств и состояния // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2008. Т. 44. № 5. С. 453–463.
16. Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Анализ смачивания как эффективный метод изучения характеристик покрытий, поверхностей и происходящих на них процессов (Обзор) // Заводская лаборатория. (Диагностика материалов). 2010. Т. 76. № 9. С.27–36.
17. Алчагиров Б.Б., Дышекова Ф.Ф., Коков З.А., Кясова О.Х., Таова Т.М., Бесланеева З.О., Хоконов Х.Б. Экспериментальная установка для изучения смачиваемости жидкометаллическими расплавами поверхностей твердых тел // Известия РАН. Серия Физическая, 2017, том 81, № 5, с. 703–708.
18. Таова Т.М., Алчагиров Б.Б., Арнольдов М.Н., Карамурзов Б.С., Хоконов Х.Б. Смачиваемость поверхностей стали 12Х18Н9Т и титана литийсодержащими сплавами олова // Труды Международного семинара «Теплофизические свойства веществ» (жидкие металлы и сплавы, наносистемы). КБГУ, г. Нальчик, С. 179–180.
19. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 томах: Т. 3. Книга 1. / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1999. 880 с.
20. Алчагиров Б.Б., Хибиев А.Х. Поверхностное натяжение эвтектического расплава $Pb_{44,6}Bi_{55,4}$ в атмосфере воздуха // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2021. Вып. 3. С. 123–135.
21. Bastasz R., Whaley J.A. Surface composition of liquid metals and alloys // Fusion Engineering and Design. V. 72. 2004. P. 111–119.
22. Bastasz R. Surface studies of liquid metals and alloys // JAERI-Conf., 2003. № 1. P. 12–18.
23. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение щелочных металлов и сплавов с их участием. М.: ТФЦ. РАН. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. 1991 г. №3 (89), 4 (90). 180 с.
24. Алчагиров А.Б., Архестов Р.Х., Дышекова Ф.Ф., Таова Т.М. Поверхностное натяжение сплавов с участием щелочных металлов // ТВТ. 2013. Т. 51. №. 2. С. 210–223.
25. Ажажа В.М., Гнедая И.Л. Щелочные металлы – получение, свойства, применение // ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2006. № 1. С. 184–194.