

УДК 538.9,621.039.531

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС НА ПСЕВДОСПЛАВ ВОЛЬФРАМ–МЕДЬ

© 2024 г. И. В. Боровицкая^{a,*}, А. С. Дёмин^a, Н. А. Епифанов^a, С. В. Латышев^{a,b},
С. А. Масляев^{a,**}, Е. В. Морозов^a, В. Н. Пименов^{a,***}, И. П. Сасиновская^a,
Г. Г. Бондаренко^{c,****}, А. И. Гайдар^d

^aИнститут металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 119334 Россия

^bМосковский технический университет связи и информатики, Москва, 111024 Россия

^cНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, 101000 Россия

^dНаучно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, 115054 Россия

*e-mail: symp@imet.ac.ru

**e-mail: maslyaev@mail.ru

***e-mail: pimval@mail.ru

****e-mail: gbondarenko@hse.ru

Поступила в редакцию 12.01.2024 г.

После доработки 12.03.2024 г.

Принята к публикации 12.03.2024 г.

Представлены результаты исследования совместного влияния на псевдосплав W–Cu импульсных потоков ионов дейтерия с плотностью мощности $q_i \approx 1 \times 10^9$ Вт/см² при длительности воздействия $\tau_i = 20$ нс и дейтериевой плазмы с параметрами $q_{pl} \approx 1 \times 10^8$ Вт/см² и $\tau_{pl} = 20$ нс, создаваемых в установке Плазменный фокус “Вихрь”. Показано, что в реализованном режиме облучения характер повреждаемости поверхностного слоя тестируемого материала зависит от состояния поверхности облучаемых образцов и числа импульсных воздействий потоков энергии. Воздействие импульсного облучения на полированную поверхность образцов псевдосплава приводит к появлению протяженных медных капель на поверхности вольфрама и к образованию множества пор, наблюдаемых как в Cu каплях, так и в W основе. Кроме того, на поверхности W появляются микротрещины, а также островки медной пленки произвольной конфигурации. Многократное облучение образцов исследуемого материала с неполированной поверхностью приводит к образованию цепочек капель вольфрама, расположенных в верхних частях протяженных гребней и сформированных при шлифовании исходных образцов. На облученной поверхности видны также лопнувшие пузыри, которые возникли в результате кипения медных включений и пленки меди, осажденной на вольфрам. Скопления таких пузырей часто локализованы вдоль гребней на поверхности вольфрама. Полученные результаты обсуждаются, путем применения численных расчетов и анализа термического влияния на рассматриваемый псевдосплав импульсного облучения.

Ключевые слова: импульсные потоки, дейтериевая плазма, ионы дейтерия, плазменный фокус, псевдосплав, поры, микротрещины.

DOI: 10.31857/S1028096024080147, EDN: EKPZYI

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что псевдосплавы (композиционные материалы, состоящие из пористого каркаса, пропитанного несмешиваемым с ним металлом или сплавом) широко применяются в разных отраслях промышленности. Сочетание различных

физико-механических свойств не взаимодействующих друг с другом компонентов придает псевдосплаву необычные интегральные потребительские свойства. В зависимости от соотношения и типа используемых в нем материалов, как правило, с заметной разницей в температурах плавления, получают псевдосплавы с широким

спектром улучшенных эксплуатационных характеристик: повышенной коррозионной и термической стойкостью, хорошими антифрикционными свойствами и высокой износостойкостью, оптимальным сочетанием прочности и пластичности, требуемой электро- и теплопроводностью и др. [1–11].

Среди рассматриваемых материалов различного назначения важное место занимают псевдосплавы на основе тугоплавких металлов — вольфрама, молибдена, тантала, ниобия. Например, псевдосплавы систем W—Cu, W—Ni—Fe и Mo—Cu активно используются в электротехнике, в изделиях полупроводниковой и вакуумной электроники, в ракетной технике [4, 7, 8]. Повышенный интерес исследователей привлекает псевдосплав системы вольфрам—медь. Он применяется как теплоотводящий материал в полупроводниковых приборах [12, 13], а также в контактах высоковольтных выключателей электродугового разряда, в которых испытывает кратковременные экстремальные тепловые нагрузки. На определенном этапе развития термоядерной энергетики псевдосплав W—Cu рассматривался как кандидатный материал для использования в диверторном узле термоядерных реакторов (ТЯР) типа Токамак [14–19]. Впоследствии, на основе исследований, в том числе в рамках международной программы создания экспериментального ТЯР ИТЕР, предпочтение было отдано чистому W [20–24].

В то же время псевдосплав W—Cu, наряду с многослойными, полимерными и др. материалами, рассматривается как кандидатный материал для защитного экрана бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) от воздействия космической радиации (потоков электронов, протонов, тяжелых заряженных частиц, рентгеновского и гамма-излучения) [25–28]. Радиационные воздействия на материалы КА в космическом пространстве носят, как правило, длительный непрерывный характер [29]. Между тем, не меньший интерес вызывает вопрос о воздействии на псевдосплав W—Cu импульсных радиационных и термических нагрузок. Однако этот вопрос еще недостаточно освещен в литературе (см, например, [17–19, 30]).

В свете сказанного, целью настоящей работы было экспериментальное исследование поведения псевдосплава W—Cu в условиях импульсных воздействий мощных пучково-плазменных потоков наносекундного диапазона длительности импульсов с использованием установки Плазменный фокус “Вихрь” (ПФ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы псевдосплава содержали вольфрама ~75%, меди ~25%Cu (об. %) и имели размеры $(1.0 \times 0.7 \times 0.4)$ см. Перед экспериментами облучаемую поверхность образцов шлифовали с использованием абразивного круга на основе карбида кремния и полировали с применением пасты на основе оксида хрома. Для экспериментов по облучению брали образцы псевдосплава двух типов: одни имели полированную поверхность, другие — неполированную шероховатую поверхность, создаваемую на предварительной стадии ее более грубой механической обработки — при шлифовании. Представляло интерес оценить, в какой степени исходная шероховатость неполированной поверхности образцов псевдосплава, остающаяся после процесса шлифования, влияет на характер взаимодействия импульсных потоков энергии с материалом в сравнении с полированной поверхностью.

В экспериментах по облучению образцы W—Cu размещались на оси камеры ПФ на расстоянии $L = 7.5$ см от анода нормально к падающему потоку энергии. В качестве рабочего газа использовали дейтерий при давлении $P_0 = 350$ Па. Плотность мощности дейтериевой плазмы (ДП) составляла $q_{pl} \sim 10^8$ Вт/см² при длительности импульсного воздействия на облучаемый образец $\tau_{pl} \sim 30\text{--}50$ нс. Плотность мощности ионов дейтерия (ИД) была $q_i \sim 10^9$ Вт/см² с длительностью $\tau_i \sim 20\text{--}30$ нс. Высокоэнергичные ИД (с энергией $E \geq 100$ кэВ) распространялись внутри пространства, ограниченного конической поверхностью с углом при вершине (в зоне максимального сжатия плазмы — пинча) $\leq 10^\circ$ [31], а ИД с меньшей энергией перемещались внутри конуса с большим углом при вершине $\sim 30^\circ$. Число импульсных воздействий N потоков ДП и ИД на образцы W—Cu варьировалось от $N = 1$ до $N = 8$.

Исследование микроструктуры облученных и исходных образцов проводили с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Элементный состав поверхностного слоя сопоставляемых образцов определяли методом локального рентгеноспектрального анализа (РСА). Применение обоих методов осуществляли на сканирующем электронном микроскопе EVO 40 фирмы Zeiss с приставкой для РСА. Анализ эволюции тепловых процессов при облучении проводили методом численного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Облучение полированной поверхности псевдосплава

На рис. 1 изображена микроструктура полированной поверхности псевдосплава W—Cu, снятая методом СЭМ. Особенность микроструктуры состоит в том, что в результате полирования исходных образцов на обрабатываемой поверхности, помимо W основы и медных включений, вследствие частичного “растирания” более мягкой меди по поверхности твердого вольфрама вокруг Cu включений возникали прилегающие к ним зоны меди. Другими словами, контур указанных зон, как правило, повторял контур Cu включений.

Результаты исследования элементного состава исходных образцов псевдосплава W—Cu методом РСА представлены на рис. 1б–г. Эти результаты подтверждают данные СЭМ и показывают, что зоны меди вокруг Cu включений содержат также W и кислород (точка 3 на рис. 1а, г). Кислород входил в состав обоих элементов псевдосплава как примесь, а W фиксируется методом РСА из-за

очень тонкого слоя меди в рассматриваемых зонах, толщина которого меньше глубины проникновения электронов при данном методе анализа.

Микроструктура псевдосплава после облучения в ПФ представлена на (рис. 2). Видно, что включения Cu выплескиваются из локальных мест своего расположения на облучаемую поверхность вольфрамового каркаса преимущественно в виде протяженных капель. На поверхности псевдосплава появляется множество пор, наблюдаемых как в Cu каплях, так и в W основе. С ростом числа импульсных воздействий (при $N = 8$) происходит некоторое увеличение числа пор, сокращение размеров и возрастание количества Cu капель, выявляются границы зерен, а также наблюдается образование на поверхности W островковых пятен (темные “размытые” участки на рис. 2б, в, размером порядка 10 мкм). Исследование облученного поверхностного слоя методом РСА (рис. 3) показало, что указанные темные пятна представляют собой островки медной пленки на поверхности W. Указанная пленка — скорее всего результат многократного осаждения меди

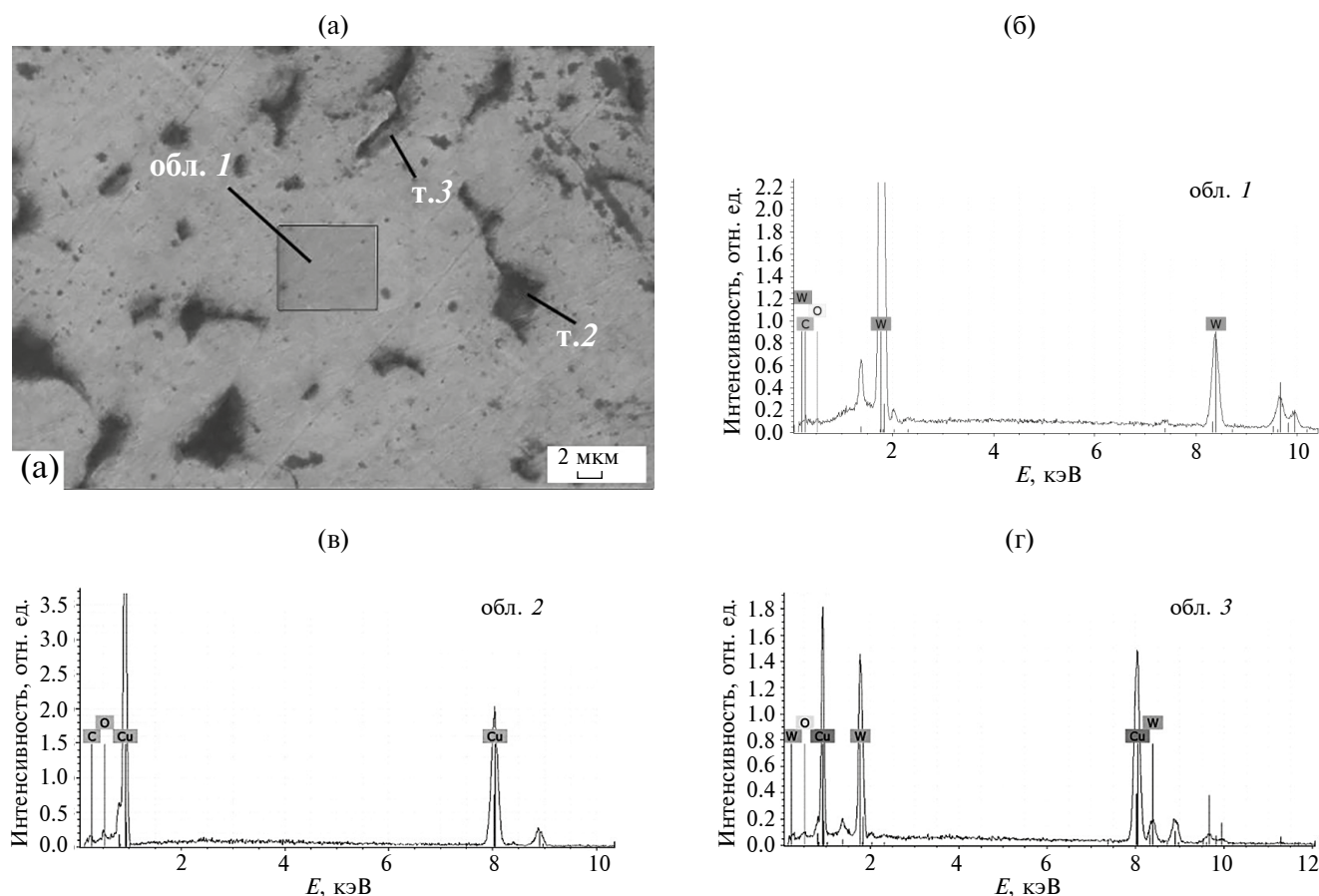


Рис. 1. Микроструктура образца псевдосплава W—Cu в исходном состоянии: (а) — СЭМ и (б–г) — его элементный состав, определенный методом РСА в точках, указанных на рис. 1а: обл. 1 — W, т. 2 — Cu, т. 3 — контур меди вокруг Cu включения.

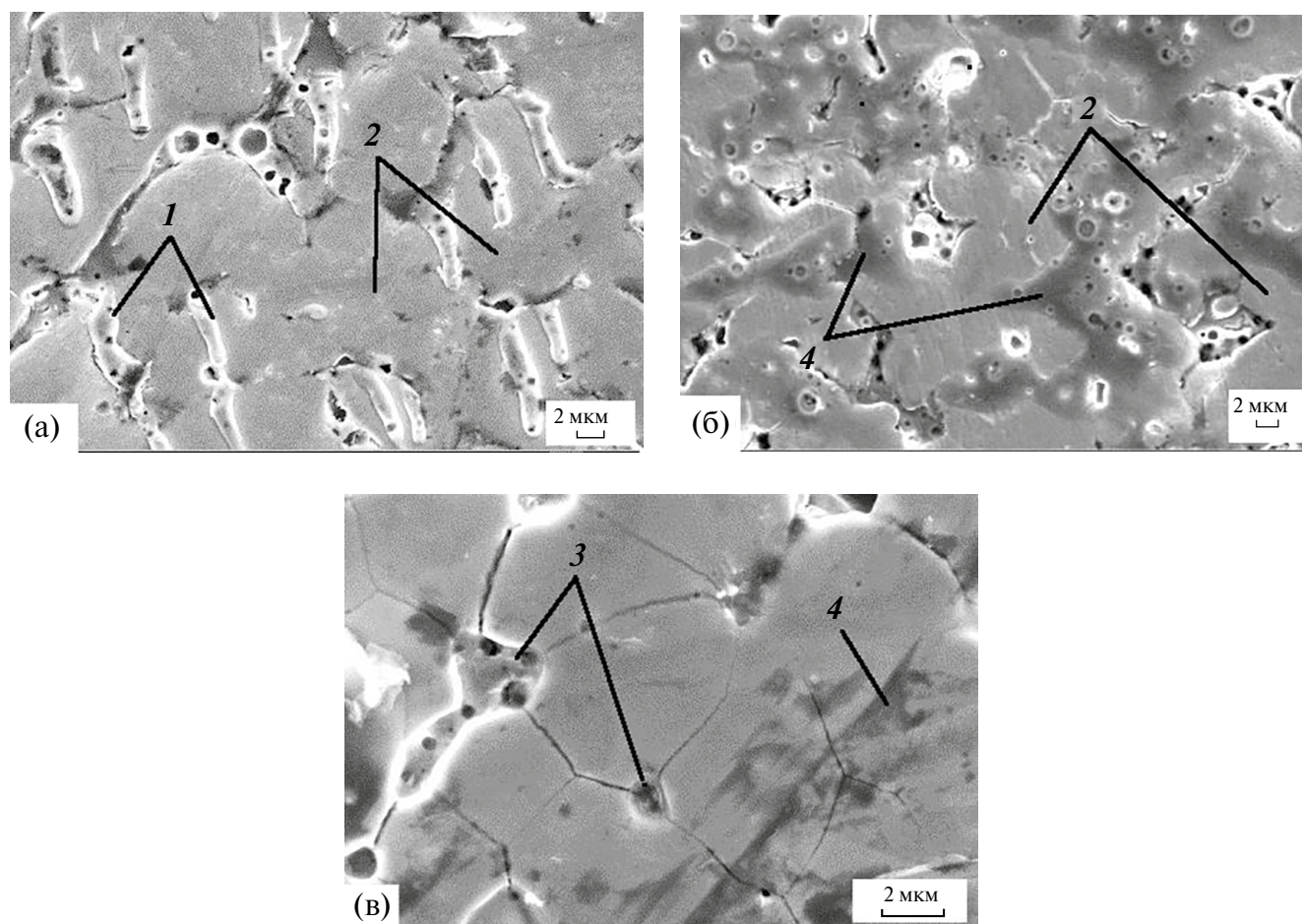


Рис. 2. Микроструктура поверхности псевдосплава W–Cu после облучения потоками ионов дейтерия и дейтериевой плазмы исходного полированного образца при различном числе импульсных воздействий N : а — $N = 4$; б, в — $N = 8$; СЭМ: 1 — капли Cu, 2 — W, 3 — поры, 4 — участки Cu пленки.

из вторичной плазмы, возникающей над облучаемой поверхностью за счет взрывного испарения меди при каждом импульсном воздействии потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы на псевдосплав. Элементный анализ показал также, что после 8 импульсных воздействий на облученной поверхности, помимо W и Cu, присутствует кислород, входивший в состав исходных образцов как примесь, а также осажденный ниобий, входивший в состав материала анода ПФ и удаляемый с его поверхности в процессах испарения и распыления электронным пучком при импульсных разрядах [32, 33].

Облучение неполированной поверхности псевдосплава

На рис. 4 представлена микроструктура неполированной поверхности псевдосплава W–Cu после облучения потоками ИД и ДП при различном числе импульсных воздействий N . Как и при облучении полированной поверхности образцов W–Cu, морфология облученной поверхности

заметно изменяется с ростом числа N . Видно, что одно импульсное воздействие не приводит к заметному изменению топографической структуры поверхности (рис. 4а).

При двукратном облучении наблюдается небольшое оплавление поверхностного слоя, преимущественно в зоне пиков — верхних частей протяженных гребней, сформированных в исходных образцах на стадии подготовки их поверхности к облучению при механической обработке (рис. 4б). После четырехкратного воздействия потоков ИД и ДП происходит более заметное оплавление поверхностного слоя, протяженные гребни на исходной поверхности (рис. 4а) практически исчезают, а вдоль направления гребней, главным образом в области их пиков, появляются цепочки сферообразных капель, содержащих поры (рис. 4в, г). Поры, а также микротрещины, возникают в разных участках облученной поверхности.

При 8 импульсных воздействиях ионно-плазменных потоков на материал наблюдаются следы

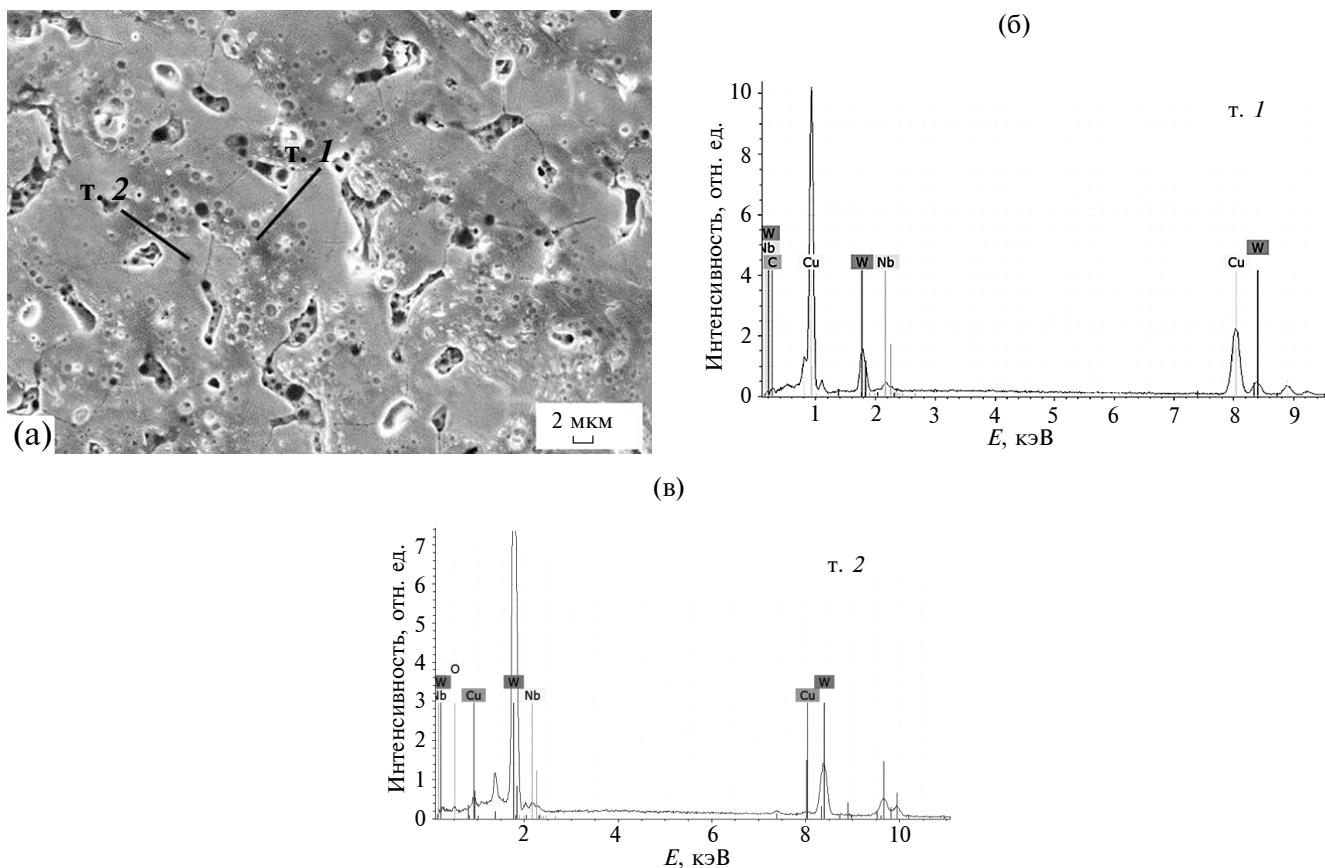


Рис. 3. Микроструктура псевдосплава W–Cu после облучения потоками ионов дейтерия и дейтериевой плазмы полированного образца при $N = 8$: (а) — СЭМ и (б, в) — элементный состав, определенный методом РСА в точках 1 и 2, указанных на рис. 3а (т. 1 — капля Cu, т. 2 — участок Cu пленки на поверхности W).

интенсивного кипения участков медной пленки, образовавшихся на поверхности вольфрама при обратном осаждении меди после нескольких предшествующих импульсов облучения. В местах скопления меди формируется пенная структура, состоящая из лопнувших пузырей меди, похожих на кратеры (рис. 5б). Скопления таких кратеров часто расположены вдоль протяженных гребней на поверхности вольфрама (рис. 5а). Кроме лопнувших “пузырей-кратеров”, на облученной поверхности присутствуют также и микротрещины (рис. 5в).

Результаты исследования облученных образцов совместно методами СЭМ и РСА представлены на рис. 6. Анализ представленных результатов показал, что сферообразные структурные фрагменты в виде цепочек на вершинах гребней (рис. 4в, г) представляют собой капли W, а в зонах, прилегающих к Cu включениям, как правило, присутствует медь, находящаяся на поверхности W каркаса в виде “островков” тонкой пленки (рис. 6а, б). Содержание меди во включениях всегда выше, чем в примыкающих к ним локаль-

ным участкам пленки на поверхности вольфрама (рис. 6в, г, точки 1 и 2).

Сравнивая результаты облучения в ПФ полированной и неполированной поверхности псевдосплава, следует отметить различный характер их повреждаемости в реализованном режиме импульсного облучения. Наиболее заметно различие проявляется в образовании только на облученной неполированной поверхности цепочек W капель, а также скоплений многочисленных поверхностных “пузырей-кратеров” размером ~ 1 мкм и более (рис. 5б), образованных, по-видимому, после разрушения оболочек пузырьков при кипении медносодержащих областей поверхностного слоя. При облучении полированной поверхности псевдосплава наблюдаемое порообразование носит в большей степени объемный характер (поры образуются в объеме поверхностного слоя, вольфрама и медных капель, рис. 2в).

Для оценки возможных механизмов возникновения обнаруженных эффектов — образования цепочек W капель (рис. 4в, г), цепочек

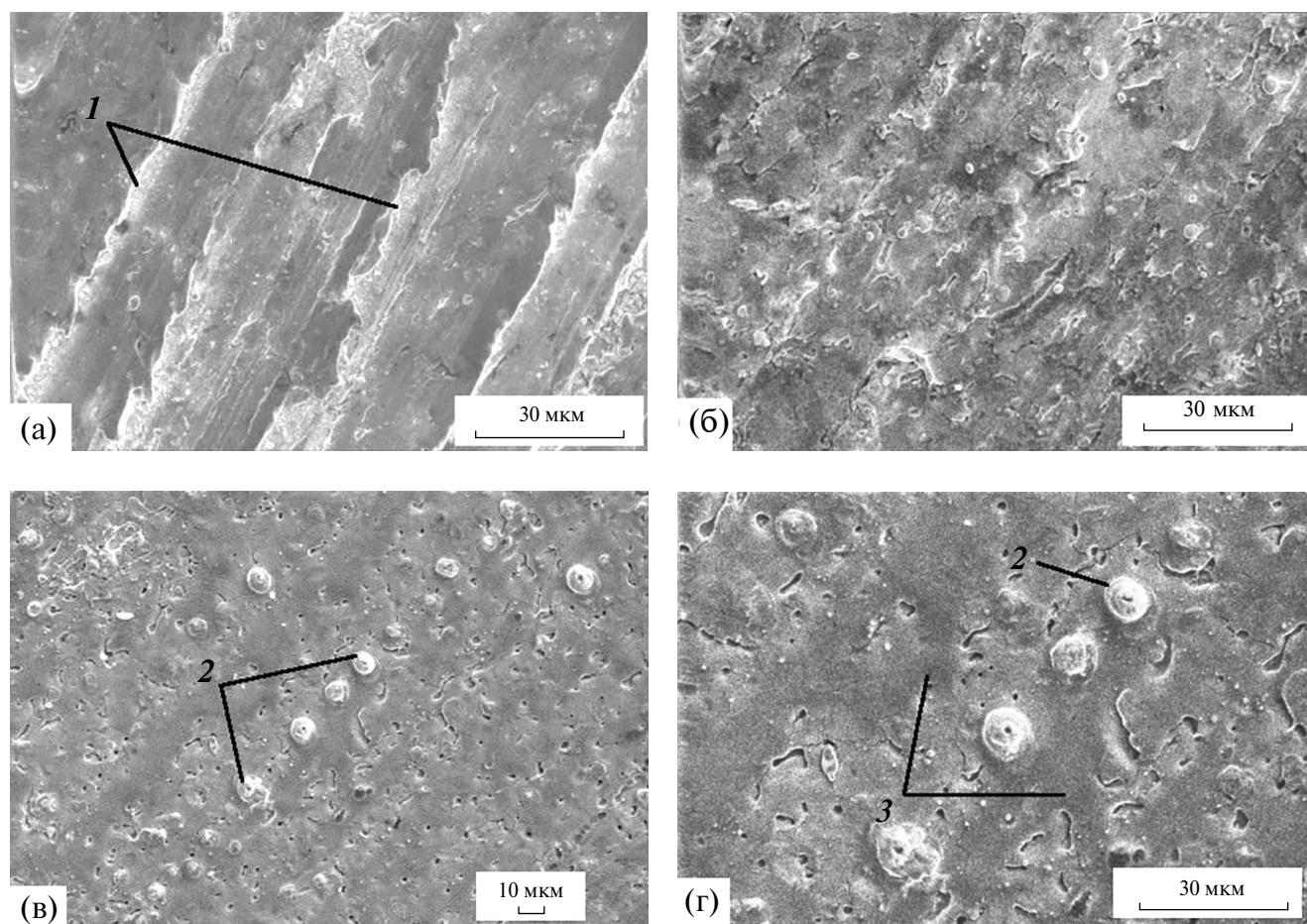


Рис. 4. Микроструктура неполированной поверхности псевдосплава W–Cu после облучения потоками ионов дейтерия и дейтериевой плазмы при различном числе импульсных воздействий N : а — $N=1$; б — $N=2$; в, г — $N=4$; СЭМ: 1 — протяженные гребни, 2 — капли W, 3 — участки Cu пленки.

и скоплений пузырей с разрушенными оболочками (рис. 5), появления участков медной пленки на поверхности W (рис. 2б, в) — выполнены расчеты эволюции температуры в поверхностном слое псевдосплава при рассматриваемых условиях пучково-плазменного воздействия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были выполнены расчеты в рамках одномерного уравнения теплопроводности с учетом поглощения энергии ионного пучка и потерь в виде теплового излучения, аналогичные работам [34, 35]. Необходимые физические характеристики вольфрама, меди и псевдосплава брались из работ [36–38].

Пробег быстрых ионов дейтерия с энергией $E \approx 100$ кэВ в вольфраме и меди близки и составляют $d \approx 1$ мкм. Скорость таких ионов 3×10^8 см/с. При разбросе по энергии 50–200 кэВ и пролетной

базе от анода до мишени $L = 7.5$ см длительность воздействия пучка быстрых ионов составляет $\tau \sim 20$ –30 нс.

Энергетическая нагрузка на мишень на расстоянии 7.5 см от анода, измеренная экспериментально, составляет 10 Дж/см². Если считать, что в центральной части мишени она определяется в основном быстрыми ионами, то плотность потока энергии быстрых ионов оказывается $q_0 \sim (3\text{--}5)10^8$ Вт/см². В расчетах форма импульса ионного пучка задавалась полусинусоидой $q(t) = q_0 \sin(\pi t/\tau)$. Основные результаты приведены в табл. 1, где T — максимальная температура мишени на стадии нагрева, $L_{\text{исп}}$ — толщина испаренного слоя мишени, $L_{\text{ж}}$ — максимальная толщина слоя жидкой фазы. Результаты для обоих значений q_0 различаются незначительно. Важно отметить, что в обоих вариантах плавится и медь, и вольфрам, а взрывное испарение происходит только у меди. Последнее объясняется тем, что температура поверхностного слоя мишени превы-

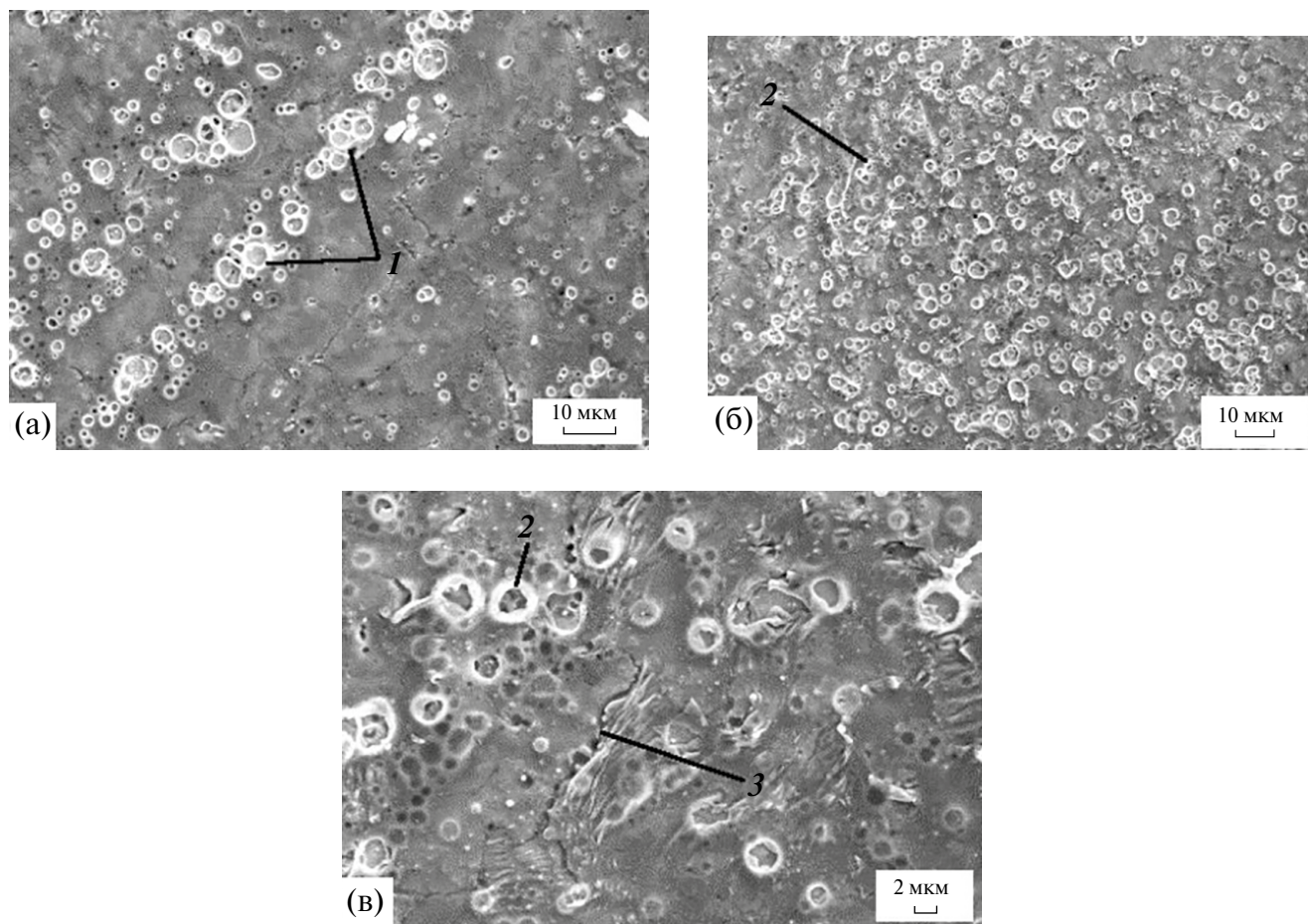


Рис. 5. Участки микроstructures непотированной поверхности псевдосплава W—Cu после облучения потоками ионов дейтерия и дейтериевой плазмы при $N = 8$. Видны цепочки и скопления пузырей с разрушенными оболочками и микротрещины: 1 — цепочка лопнувших пузырей, 2 — скопления лопнувших пузырей, 3 — микротрещины.

шает критическую температуру для меди 5900°C , но не достигает критической температуры вольфрама 13000°C [37].

На рис. 7а приведена динамика движения границ плавления вольфрама и меди (температуры плавления W — 3420°C , Cu — 1083°C) для параметров $q_0 = 3 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $\tau = 30 \text{ нс}$, время отсчитывается от начала действия ионного пучка. На рис. 7б приведены распределения температуры в мишени при $q_0 = 3 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $\tau = 30 \text{ нс}$ для двух моментов времени: $t = 30 \text{ нс}$ — момент окончания действия ионного пучка и $t = 200 \text{ нс}$ — момент возврата границы плавления вольфрама к поверхности мишени. Анализ показывает, что максимальная толщина расплавленного слоя для W достигается ко времени $t \sim 70 \text{ нс}$, для Cu через $t \sim 800 \text{ нс}$. Далее происходит обратный процесс кристаллизации за счет отвода тепла вглубь мишени, и полное исчезновение жидкости достигается для W за время $t \sim 200 \text{ нс}$, для Cu через $t \sim 2 \text{ мкс}$.

В экспериментах наблюдалось сильное

распространение меди по поверхности. Основными механизмами являются, по-видимому, испарение и последующее частичное осаждение меди в отсутствие испарения вольфрама, а также разбрызгивание капель жидких поверхностных слоев как меди, так и вольфрама под действием давления вторичной плазмы, создаваемой испарением меди.

Что касается цепочек W капель на поверхности псевдосплава W—Cu (рис. 4в, г), то их образование связано с более легким, по сравнению с массивной основой W, плавлением мелких вершин гребней, созданных при механической обработке образцов. В случае полированной поверхности псевдосплава гребни отсутствуют и подобного образования капель на его поверхности в реализованных режимах облучения не наблюдается.

Из проведенных расчетов следует, что возрастание порообразования, происходящее с ростом числа импульсных воздействий N в обоих

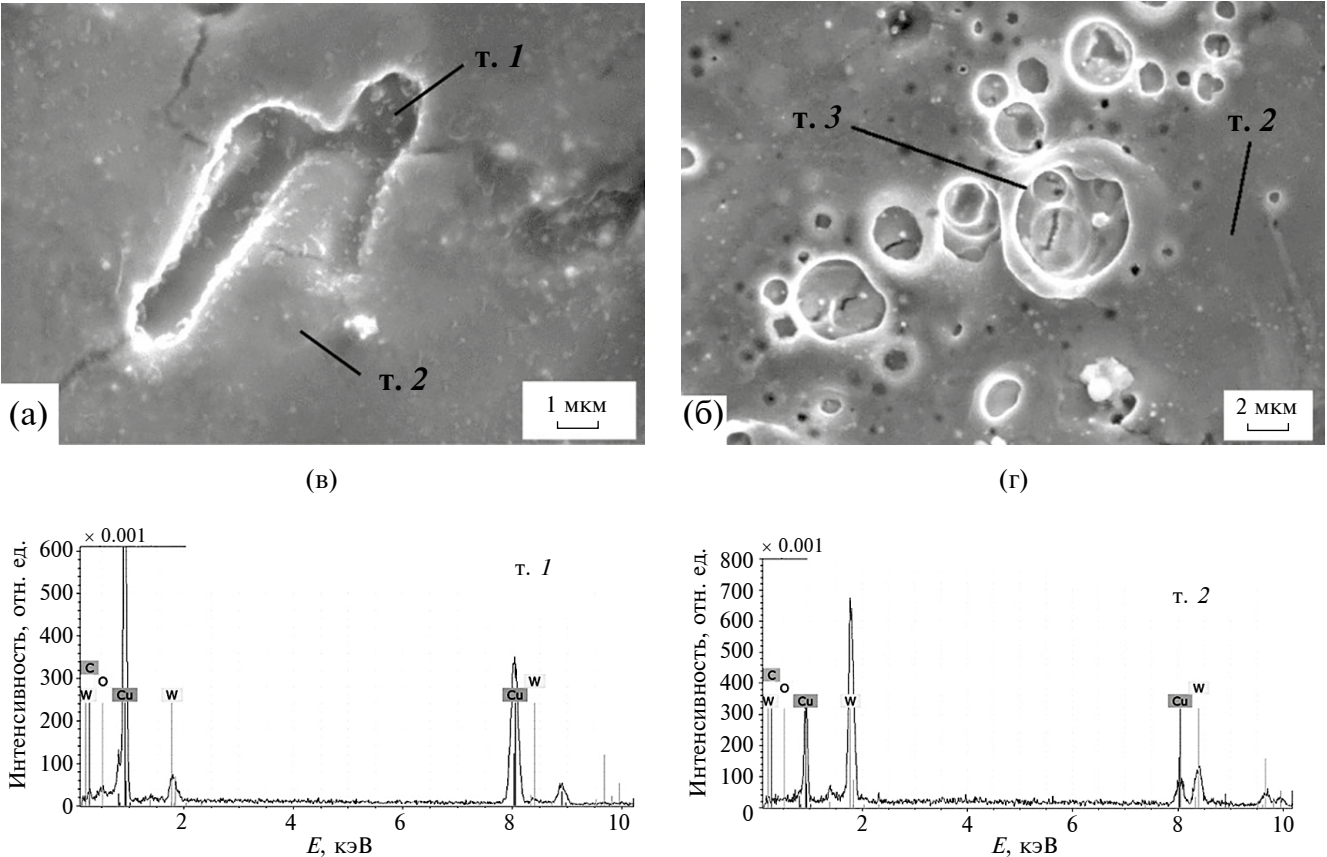


Рис. 6. Участки микроструктуры неполированной поверхности псевдосплава W–Cu после облучения потоками ионов дейтерия и дейтериевой плазмы при $N = 4$ (а), $N = 8$ (б) — СЭМ и элементный состав (в, г), определенный методом РСА в точках 1 и 2, указанных на рис. 6а (т. 1 — включение Cu, т. 2 — пленка меди на поверхности W, т. 3 — лопнувшие пузыри).

Таблица 1. Температура, толщина слоев плавления и испарения образца W–Cu после однократного импульсного воздействия

q_0 , Вт/см ²	τ , нс	T , °C	Cu, $L_{\text{исп}}$, мкм	Cu $L_{\text{ж}}$, мкм	W $L_{\text{ж}}$, мкм
3×10^8	30	10300	1.2	8.9	2.3
5×10^8	20	11200	1.3	9.0	2.5

сопоставляемых случаях, связано с усилением формирования газовой фазы в расплаве меди и, соответственно, с увеличением интенсивности его кипения. Этому способствует наличие в обоих компонентах псевдосплава газообразующих элементов примесей (кислорода и углерода), а также имплантация в материал ионов дейтерия при импульсных разрядах. Когда Cu находится в протяженных (~десятки мкм), но узких (диаметр сечения ~ единицы мкм) каналах W каркаса, испаряемые пузырьки формируются в цепочки преимущественно с разрушенными

оболочками (рис. 5а, 6б). В больших объемах каналов, заполненных медью (с диаметром сечения ~100 и более мкм), на облученной поверхности наблюдаются скопления испаряемых из меди пузырьков (рис. 5б). Необходимо также отметить, что процесс кипения Cu с увеличением числа N может происходить не только в объеме медных капель, но и в тонких пленках меди, осажденной в виде локальных островков на облучаемую поверхность при импульсных воздействиях потоков энергии (рис. 2б).

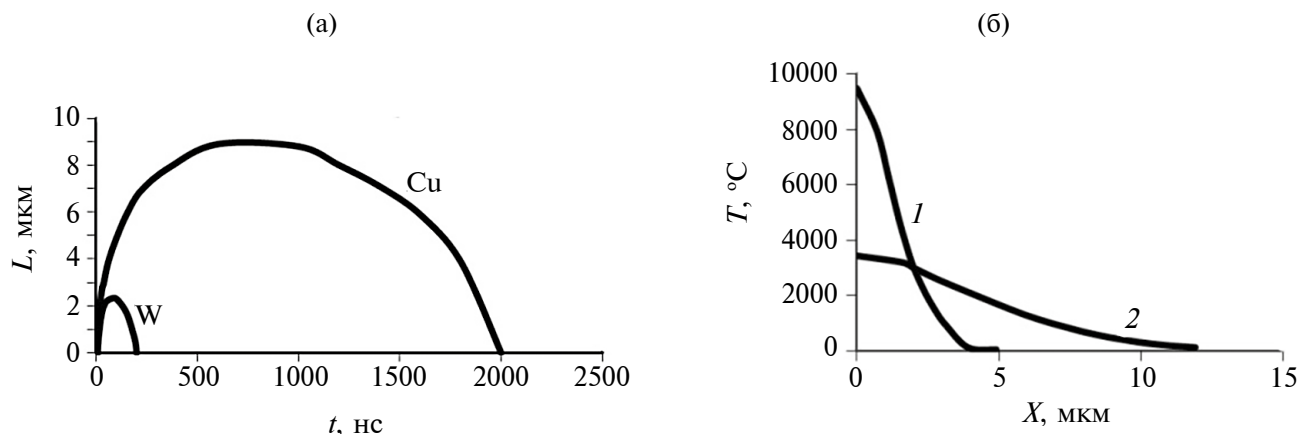


Рис. 7. Динамика движения границ раздела твердой и жидкой фаз меди и вольфрама в поверхностном слое псевдосплава W–Cu (а) и распределение температуры в его поверхностном слое (б) после однократного импульсного воздействия энергии для двух моментов времени: 1 – $t = 30$ нс, 2 – $t = 200$ нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано совместное влияние на псевдосплав W–Cu импульсных потоков ионов дейтерия с плотностью мощности $q_i \sim 10^9$ Вт/см² при длительности воздействия $\tau_i \sim 20$ –30 нс и дейтериевой плазмы с параметрами $q_{pl} \sim 10^8$ Вт/см² и $\tau_{pl} \sim 30$ –50 нс, создаваемых в установке Плазменный фокус “Вихрь”. Показано, что в реализованном режиме облучения характер повреждаемости поверхностного слоя материала зависит от состояния облучаемой поверхности и числа импульсных воздействий потоков энергии.

Воздействие импульсного облучения на полированную поверхность псевдосплава приводит к появлению протяженных медных капель на поверхности вольфрама и к образованию множества пор, наблюдаемых как в Cu каплях, так и в W основе. Кроме того, на поверхности W появляются микротрещины, а также островки медной пленки произвольной конфигурации.

При многократном облучении неполированной поверхности исследуемого материала, созданной при его более грубой механической обработке, наряду с отмеченными структурными изменениями зафиксированы иные эффекты. При небольшом числе импульсных воздействий $N = 4$ наблюдается образование цепочек W капель, расположенных, как правило, в верхних частях протяженных гребней, сформированных на стадии подготовки поверхности образцов к облучению. При возрастании числа импульсных воздействий до $N = 8$ на облученной поверхности обнаружены участки пузырьков с разрушенными оболочками, которые встречаются в виде скоплений и в виде цепочек, подобных цепочкам W-капель и расположенных также вдоль протяженных вершин гребней.

Анализ термического влияния на псевдосплав рассматриваемого импульсного облучения, выполненный численным методом, показал, что обнаруженные эффекты связаны главным образом с тремя процессами: плавлением поверхностных слоев обоих компонентов материала; интенсивным кипением медной фазы с последующим осаждением паров Cu на поверхность W в виде тонкой пленки; а также с возможностью выплескивания медных капель из каналов в вольфрамовом каркасе на его поверхность.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00320-24-00 и поддержана Международным Агентством по Атомной Энергии (грант IAEA CRP № 24080).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов В.В., Артемьева О.А., Крайцова Е.Д. Материаловедение и технология композиционных материалов. СГОУВПО “Сибирский федеральный университет”. Красноярск, 2007. 238 с.
2. Шацов А.А. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 6. С. 21.
3. Дьячкова, Л. Н. // Материалы, технологии, инструменты. 2007. Т. 12. № 2. С. 60.
4. Тихий Г.А. Структура, свойства и технология получения тугоплавких псевдосплавов W–Ni–Fe и Mo–Cu при использовании механоактивированной наноразмерной порошковой шихты: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: Самара: ГОУ ВПО “Самарский государственный технический университет”, 2008. 23 с.

5. Чувильдеев В.Н., Москвичева А.В., Баранов Г.В., Нохрин А.В., Лопатин Ю.Г., Белов В.Ю., Благовещенский Ю.В., Шотин С.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 22. С. 27.
6. Вигилянская Н.В., Борисов Ю.С., Демьянов И.А. // Автоматическая сварка. 2012. № 1. С. 48.
7. Прасицкий Г.В. Экспериментальные и теоретические исследования основных операций изготовления псевдосплавных материалов методами прокатки порошков // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга. 2015. Т. 1. С. 166.
8. Прасицкий Г.В., Коржавый А.П. Определение размера пор молибденовых каркасов, применяемых для производства молибденово-медных псевдосплавов // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга. 2017. Т. 1. С. 114–116.
9. Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Григорчик А.Н., Яловик А.П., Дудан А.В. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Материаловедение. 2018. № 11. С. 95.
10. Дьячкова Л.Н. // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2022. Т. 67. № 1. С. 27.
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-27-38>
11. Бондаренко Г.Г., Коржавый А.П., Прасицкий В.В., Прасицкий Г.В. // Металлы. 2019. № 6. С. 65.
12. Пономарев В.А., Яранцев Н.В. Порошковые материалы для изделий электронной техники / Под ред. А.П. Коржавого/ М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 304 с.
13. Инюхин М.В., Коржавый А.П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. № 8. С. 10.
14. Иванов Л.И., Маркушев В.Л., Масляев С.А., Пименов В.Н., Резницкий М.Е., Сасиновская И.П., Цепелев А.Б. // Физика и химия обработки материалов. 1995. № 2. С. 24.
15. Иванов Л.И., Пименов В.Н., Масляев С.А., Цепелев А.Б., Сасиновская И.П., Никель Х., Линке Дж., Дуве Р. // Перспективные материалы. 1996. № 4. С. 35.
16. Udris Y.Y. // Metally. 1996. № 1. Р. 19.
17. Bondarenko G.G., Udris Y.Y. // Journal of Nuclear Materials. 1996. V. 233–237. Р. 688.
18. Bondarenko G.G., Udris Y.Y. // Fusion Eng. Des. 1998. V. 39–40. Р. 419.
19. Bondarenko G.G., Udris Ya. Ya. Yakushin V.L. // Fusion Engineering and Design. 2000. V. 51–52. Р. 81.
20. Philipps V. // Journal of Nuclear Materials. 2011. V. 415. Р. 2.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.01.110>
21. Shu W.M., Nakamichi M., Alimov V.K., Luo G.N. // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390–391. Р. 1017.
22. Neu R., Hopf Ch., Kallenbach A., Pütterich T., Dux R., Greuner H., Gruber O., Herrmann A., Krieger K., Maier H., Rohde V. // Journal of Nuclear Materials. 2007. V. 367–370. Part B.P. 1497.
23. Neu R. // Journal: IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. № 3. Р. 453.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2040092>
24. Будаев В.П. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып. 4. С. 5.
25. Заболотный В., Старостин Е., Кочетков А. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 5. С. 8.
26. Васilenков Н., Максимов А., Грабчиков С., Ластовский С. // Электроника. Наука, технология, бизнес. 2015. № 4(00144). С. 50.
27. Черкашина Н.И., Матюхин П.В., Ястребинский Р.Н., Павленко З.В., Демченко О.В. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-6. С. 991.
28. Матюхин П.В. // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 9(28). С. 39.
29. Новиков Л.С. Модель космоса. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л.С. Новикова. 8-е изд. М.: Изд-во Книжный дом Университет. 2007. 1144 с.
30. Ivanov Lev I., Pimenov Valery N., Maslyayev Sergey A., Dyomina Elena V., Gribkov Vladymir A., Mezzetti Franco, DeChiara Paola, Pizzo Linda. // Nukleonika. 2000. V. 45. № 3. Р. 203.
31. Грибков В.А., Демин А.С., Демина Е.В., Дубровский А.В., Карпинский Л., Масляев С.А., Падух М., Пименов В.Н., Шольц М. // Прикладная физика. 2011. № 3. 43.
32. Пименов В.Н., Боровицкая И.В., Демин А.С., Епифанов Н.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Морозов Е.В., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 6. С. 5
<https://doi.org/10.30791/0015-3214-2021-6-5-17>
33. Пименов В.Н., Боровицкая И.В., Демин А.С., Епифанов Н.А., Казилин Е.Е., Латышев С.В., Масляев С.А., Морозов Е.В., Сасиновская И.П., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. // Перспективные материалы. 2022. № 5. С. 17.
<https://doi.org/10.30791/1028-978X-2022-5-17-30>.
34. Грибков В.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Пименов В.Н. // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 6. 16.
35. Латышев С.В., Грибков В.А., Масляев С.А., Пименов В.Н., Падух М., Желиньска Э. // Перспективные материалы. 2014. № 8. С. 5.
36. Физические величины. / Справочник под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991. 1232 с.
37. Николаев О.С. Критическое состояние металлов. М.: ЛЕНАНД, 2006, 128 с.
38. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Ленинград: Энергия, 1974. 264 с.

Influence of Pulsed Beam-Plasma Impact on a Tungsten–Copper Pseudoalloy in the Plasma Focus Device

I. V. Borovitskaya^{1, *}, A. S. Demin¹, N. A. Epifanov¹, S. V. Latyshev^{1, 2}, S. A. Maslyaev^{1, **},
E. V. Morozov¹, V. N. Pimenov^{1, ***}, I. P. Sasinovskaya¹, G. G. Bondarenko^{3, ****}, A. I. Gaidar⁴,

¹*A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the RAS, Moscow, 119334 Russia*

²*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, 115054 Russia*

³*HSE University, Moscow, 101000 Russia*

⁴*Research Institute of Advanced Materials and Technologies, Moscow, 115054 Russia*

*e-mail: symp@imet.ac.ru

**e-mail: maslyaev@mail.ru

***e-mail: pimval@mail.ru

****e-mail: gbondarenko@hse.ru

The results of a study of the combined effect on the W–Cu pseudoalloy of pulsed flows of deuterium ions with a power density $q_i \approx 1 \times 10^9$ W/cm² at an exposure duration of $\tau_i = 20$ ns and deuterium plasma with parameters $q_{pl} \approx 1 \times 10^8$ W/cm² and $\tau_{pl} = 20$ ns generated in the Plasma Focus setup “Vikhr” are presented. It is shown that in the implemented mode of irradiation, the nature of the damage to the surface layer of the tested material depends on the state of the surface of the irradiated samples and the number of pulsed impacts of energy flows. The impact of pulsed irradiation on the polished surface of pseudoalloy samples leads to the appearance of extended copper drops on the tungsten surface and to the formation of many pores, which are observed both in Cu drops and in the W matrix. In addition, microcracks appear on the W surface, as well as islands of a copper film of arbitrary configuration. Repeated irradiation of samples of the studied material with an unpolished surface leads to the formation of chains of tungsten droplets located in the upper parts of extended ridges formed during grinding of the original samples. Bursting bubbles are also visible on the irradiated surface, which arose as a result of the boiling of copper inclusions and a copper film deposited on tungsten. Clusters of such bubbles are often localized along ridges on the tungsten surface. The results obtained are discussed using numerical calculations and analysis of the thermal effect on the considered pseudoalloy under pulsed irradiation.

Keywords: pulsed flows, deuterium plasma, deuterium ions, plasma focus, pseudoalloy, pores, microcracks.