Нанесение многокомпонентного пленочного покрытия на металлическую подложку с использованием установки Плазменный фокус

Е. В. Морозов, С. А. Масляев, А. С. Демин, В. Н. Пименов, В. А. Грибков, Е. В. Демина, Э. М. Лазарев, А. С. Гордеев, И. П. Сасиновская, М. М. Ляховицкий, О. В. Синицына

Исследованы возможности нанесения многокомпонентного пленочного покрытия на металлическую подложку, расположенную в катодной зоне установки Плазменный фокус (ПФ). Рассмотрены особенности нанесения покрытия на модельный материал Cu в форме дуги методом испарения и последующего осаждения на медную подложку элементов полой трубы из хромомарганцевой аустенитной стали 25Х12Г20В, расположенной вдоль оси рабочей камеры установки ПФ-1000, посредством воздействия мощными импульсными потоками дейтериевой плазмы и быстрых дейтронов. Показано, что в реализованном режиме облучения (при плотности мощности плазменного потока $q = 10^8 – 10^9$ Вт/см^2 в зоне его воздействия на трубу и $q \approx 10^6$ Вт/см^2 в области взаимодействия плазмы с медной подложкой) предложенная методика позволяет получить на поверхности подложки покрытие субмикронной толщины, в состав которого входят испаренные элементы стальной трубы. Рассмотрены эффекты, возникающие при более мощном комбинированном воздействии на трубу и подложку потоков дейтериевой плазмы и быстрых дейтронов. Обсуждается структурное состояние, элементный состав, механические характеристики и возможные механизмы упрочнения нанесенного пленочного покрытия.

Ключевые слова: Плазменный фокус, многокомпонентное плёночное покрытие, Оже-спектроскопия, нанотвёрдость, модификация поверхностного нанослоя.

Введение

В настоящее время мощные импульсные пучки заряженных частиц микро- и наносекундного диапазона длительности широко используют как для решения научных задач в области радиационной физики твердого тела, так и в прикладном аспекте — для различных технологических применений [1 – 3]. Например, в авиастроении активно применяется вакуумная плазменная технология высоких энергий (ВПТВЭ) для создания жаростойких покрытий с целью защиты лопаток турбин от внешних воздействий [4]. Данная технология, в зависимости от энергии ионов E, позволяет осуществлять как процесс ионной очистки (при $E = 3 \cdot 10^2 – 10^3$ эВ), так и осаждение покрытия ($E \leq 10^2$ эВ) на термоактивируемую поверхность.

Большое распространение получили компрессионные плазменные потоки (КПП), которые могут быть эффективно использованы для перемешивания в системе “покрытие – подложка”, позволяя создавать поверхностные слои, содержащие элементы покрытия, подложки и плазмообразующего газа, толщиной как в несколько десятков микрометров, так и субмикронного масштаба [5 – 7].

В атомной энергетике радиационно-пучковые воздействия, в частности потоки высокотемпературной импульсной плазмы (ВТИП), применяют для модифицирования структурно-фазового состояния поверхностных слоев конструкционных материалов, используемых в ядерных реакторах [8, 9].

В последние годы, в связи с интенсивным развитием нанотехнологий, большой интерес вызывает вопрос о создании модифицированных слоев и

синтезе покрытий наноразмерного масштаба [10, 11]. Это связано с тем, что нанопленки и наноструктурные материалы, в отличие от “макроматериалов”, имеют специфическое структурное состояние и обладают совокупностью уникальных прочностных и физико-химических свойств. Например, нанопленки, нанесенные на поверхность соединяемых керамических материалов, способствуют более высокой прочности их неразъемных паяных швов [12]. С использованием высокочастотной плазмы пониженного давления достигается поверхностное упрочнение и повышение коррозионной стойкости образцов из стали и титановых сплавов за счет формирования в обрабатываемом поверхностном слое модифицированного нанослоя [13]. В ряде работ [14 – 17]рассматривается возможность создания тонкопленочных металлических покрытий с использованием метода испарения материала анода мощным электронным пучком в установке Плазменный фокус (ПФ) с последующим осаждением испаренных компонентов на образец-подложку, расположенный в катодной зоне рабочей камеры.

Цель настоящей работы — исследование возможности получения многокомпонентного тонкопленочного покрытия на металлической подложке, размещенной в катодной области ПФ, посредством осаждения элементов, входящих в состав функционального образца-мишени (также расположенного в катодной зоне ПФ) и испаряемых потоками ВТИП и пучком быстрых высокоэнергетических ионов. В отличие от вышеуказанных работ, связанных с применением установок ПФ в рассматриваемом аспекте, в данной работе для нанесения покрытия на подложку источником испаряемых элементов является материал не анода рабочей камеры, а специального функционального образца, расположенного, как и подложка, в катодной части установки. Общая же постановка эксперимента опирается на методологию, изложенную ранее в работах [18 – 20].

Материалы и условия облучения

В качестве функционального образца-мишени, материал которого использовали для испарения и нанесения на подложку, была выбрана полая шестигранная труба из малоактивируемой хромомарганцевой аустенитной стали типа 25Х12Г20В, расположенная, как и в работах [18, 19], вдоль оси рабочей камеры установки PF-1000 (рис. 1). Элементный состав стали 25Х12Г20В следующий, в масс. %: C — 0,26, Cr – 12,9, Mn — 19,3, Si — 0,13, W — 2,0, V — 0,15, Sc — 0,1 [18]. Модельным материалом подложки служила медная дуга, которая была закреплена на

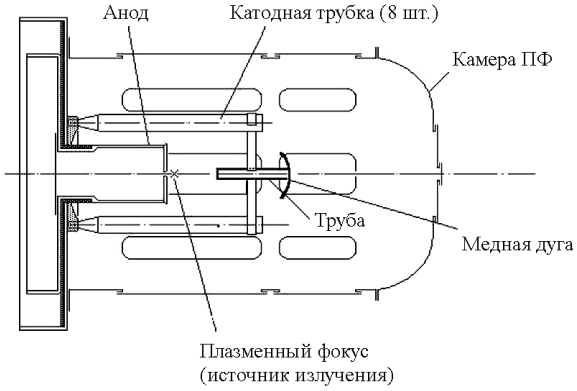


Рис. 1. Схема облучения стальной трубы в установке PF-1000” [18].

наиболее удаленном от анода торце трубы и имела следующие размеры: радиус R(Cu) = 30 см, длина дуги L(Cu) = 35 см, ширина a(Cu) = 1,5 см, толщина h(Cu) = 0,12 см. При выборе материала подложки учитывалось, что медь и медные сплавы широко используются в промышленности как конструкционные и функциональные материалы для работы при достаточно высоких температурах и в условиях воздействия агрессивных сред. Поэтому представлялось целесообразным изучение модифицирования поверхностных слоев (ПС) меди посредством нанесения покрытий, в том числе легирования, в процессе импульсной ионно-плазменной обработки.

Методика экспериментов по облучению рассматриваемой конструкции “полая стальная труба/медная дуга” мощными импульсными потоками ионов дейтерия и дейтериевой плазмы (ДП) описана в работе [18]. В соответствии с этой методикой, на трубу-мишень действовали потоки ДП в виде кумулятивной струи и порождаемой ею полусферической ударной волны со средней температурой до 1 кэВ и скоростью около $v_p \approx (2-4)\cdot 10^7$ см/с, а также потоки быстрых ионов дейтерия с энергией дейтронов $E_i \geq 100$ кэВ и скоростью движения примерно в 10 раз более высокой, чем скорость плазмы, то есть порядка $v_i \approx (2-4)\cdot 10^8$ см/с. Сгусток ДП длиной $L_p \sim 10$ см пересекал плоскость переднего среза трубы со скоростью v_p за время $\tau \leq 1$ мкс, тогда как сгусток быстрых ионов дейтерия сходной длины воздействовал в течение времени ≤ 100 нс. Плотность мощности потока ДП в этой плоскости составляла $q_p \approx 10^9$ Вт/см^2, а соответствующая величина для потока высокоэнергичных дейтронов была более высокой и лежала в пределах $q_i \approx 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см^2. Общее число разрядных импульсов $N = 4$.

Методы исследования

После экспериментов по облучению медную дугу разрезали на отдельные образцы размером $1{,}5 \times 1{,}0 \times 0{,}12$ см^3, которые перед последующими исследованиями нумеровали в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Каждый из образцов содержал облученную и необлученную стороны, причем образы, расположенные в центральной части Cu-дуги и закрывавшие задний торец полости стальной трубы (рис. 1) подвергались воздействию мощных потоков ионов дейтерия и ДП. В то же время участки Cu-дуги, расположенные вне трубы-мишени, испытывали воздействие рассеянных потоков ионов и ДП, а также служили подложкой для осаждения испаряемых воздействием энергетических потоков элементов облучаемой трубы.

Образцы были исследованы методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием соответственно микроскопа Neophot-32 и установки EVO – 40 фирмы ZEISS, рентгеновского фазового анализа (дифрактометр фирмы Rigaku), атомно-силовой микроскопии (АСМ) — микроскоп “ФемтоСкан” (Центр перспективных технологий, Россия), Оже-спектрального анализа (Оже-спектрометр JAMP 9500F), а также посредством измерения микротвердости в слоях субмикронной и наноразмерной толщины (нанотвердости). Определение нанотвердости и модуля Юнга в ПС указанных масштабов проводили с использованием установки “Nanotest” методом кинетической нанотвердости, в котором измеряемая величина твердости соответствует строго фиксированной глубине погружения индентора.

Результаты и обсуждение

Рельеф и микроструктура осажденного покрытия

Поверхность Cu-дуги, закрепленной на холодном торце трубы и обращенной к источнику излучения, условно можно разделить на две части — “внешнюю”, расположенную вне габаритов трубы, и центральную, закрывающую полость трубы и служащую как бы ее заглушкой (рис. 1). Внешняя поверхность Cu была подвержена, главным образом, воздействию потоков плазмы, а центральная, как уже отмечалось выше — комплексному воздействию мощных ионных и плазменных потоков. В первом случае, как показывают оценки, на облучаемую поверхность действовали потоки плазмы с плотностью мощности излучения $q_p \approx 10^6$ Вт/см^2, которые способствовали имплантации в материал ионов рабочего газа с энергией ионов плазмы $E_i \approx 1$ кэВ и приводили к

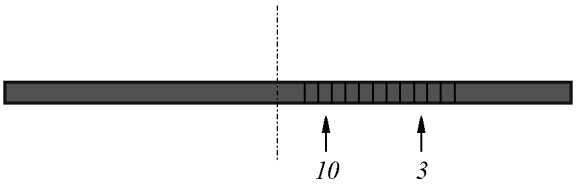
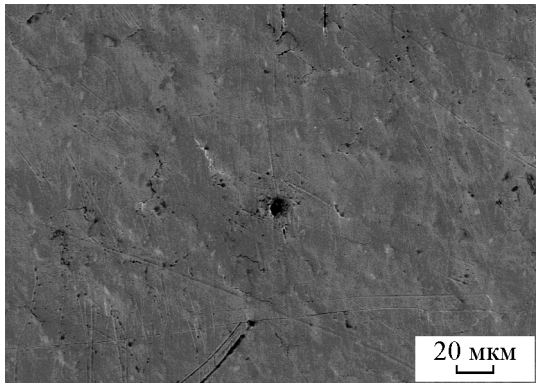
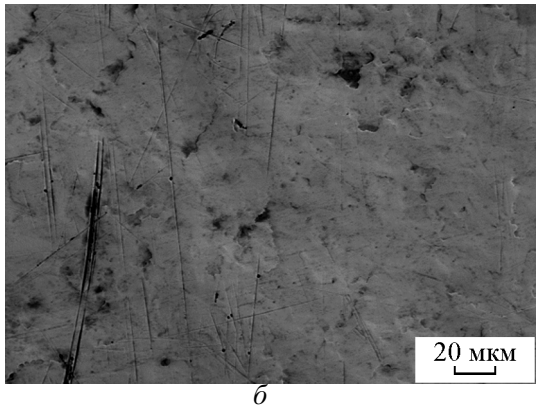


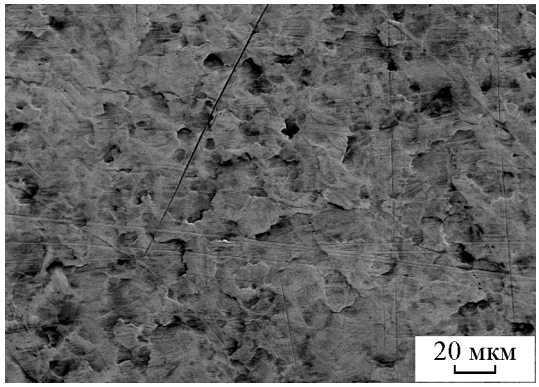
Рис. 2. Схема разрезания медной трубы на образцы.



а



б



в

Рис. 3. РЭМ поверхности медной дуги до облучения (*а*) и после облучения дейтериевой плазмой и осаждения покрытия: *б* — вблизи внешней поверхности трубы (обр. № 10), *в* — на периферии медной дуги (обр. № 3).

небольшому оплавлению поверхности. На центральный же участок поверхности Cu-дуги действовали весьма интенсивные потоки падающего излучения [18 – 20] при $q_i \approx 10^8$ Вт/см^2, которые, как правило, генерируют в мишени процессы плавления и испарения ПС и приводят к существенной повреждаемости облученной поверхности.

Визуальный анализ Cu-дуги после проведенных экспериментов показал, что ее поверхность, облученная, главным образом, потоками ДП, изменила первоначальный "медный" цвет на "стальной". Этот факт указывает на образование покрытия на медной подложке. Очевидно, что ДП, двигаясь вдоль наружной поверхности шестигранной стальной трубы, испаряла элементы, входящие в ее состав (преимущественно из горячей, более близкой к аноду, и центральной зон), и способствовала их переносу и осаждению на облучаемую поверхность Cu-дуги. Аналогичные процессы, протекающие в полости трубы на ее внутренней поверхности, имеют более сложный характер. Они связаны с комплексным воздействием интенсивных потоков ионов дейтерия и плазмы на материал и детально рассмотрены в работах [18 – 22].

Микроструктура исследуемого покрытия в разных зонах облучения представлена на рис. 3. Анализ показал, что на периферии Cu-дуги (обр. № 3 на рис. 2 и 3*в*) осажденное покрытие является несколько более рыхлым, чем в центральной зоне (обр. № 10 на рис. 2 и 3*б*), примыкающей к внешней поверхности стальной трубы. Данный факт связан с ослаблением интенсивности воздействия плазменного потока на материал по мере его удаления от оси рабочей камеры. Интересно также, что по данным АСМ микроструктура на периферии медной дуги носит наноструктурный характер, в то время как в зоне более интенсивного плазменного воздействия (рис. 4) формируется более крупнозернистая структура — с характерным размером зерна порядка 1 мкм. Этот "эффект наноструктурирования", наблюдаемый в периферийной зоне облучения, вероятнее всего связан с особыми условиями формирования осажденного покрытия в этой зоне, определяемыми тепловыми и физико-химическими процессами, и требует самостоятельного дальнейшего исследования.

Степень неровности поверхностного рельефа, определенная с помощью профилометрии участков методом АСМ в зоне, примыкающей к внешней поверхности облучаемой трубы (образец № 10 на рис. 2) заметно выше, чем на участках, удаленных от этой зоны (рис. 5). В целом же, наблюдается значительно более равномерная топография поверхности

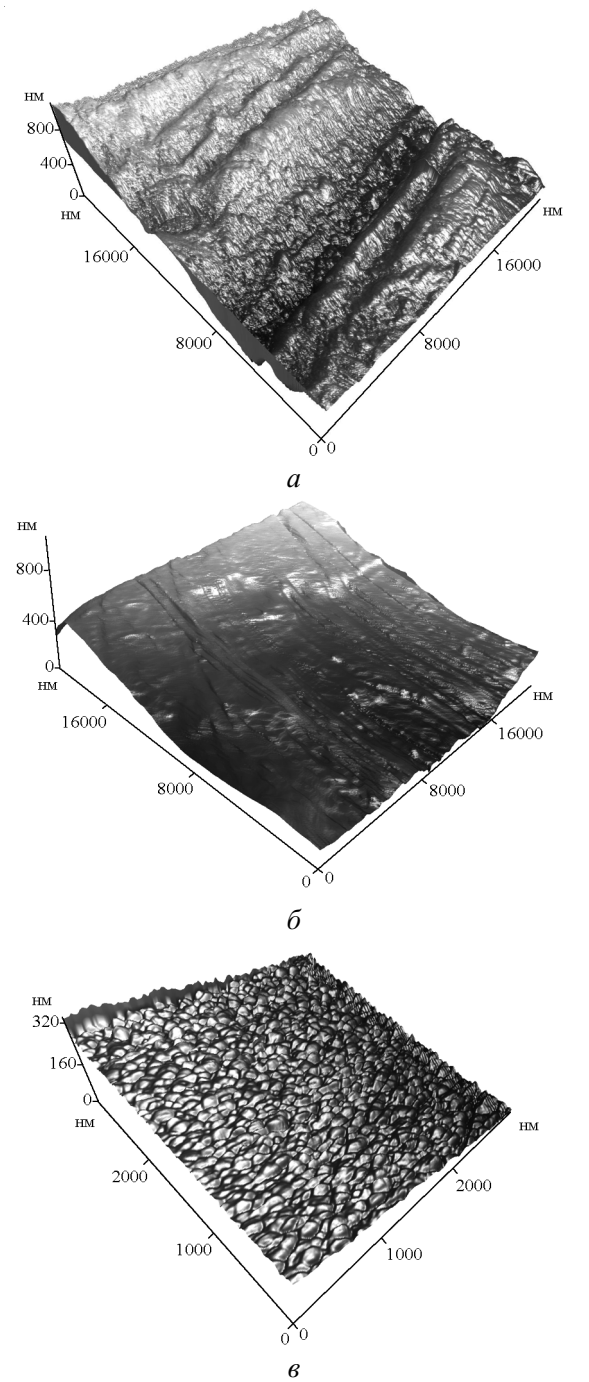


Рис. 4. АСМ изображения участков поверхности медной дуги до облучения (*а*) и после облучения ДП и осаждения покрытия: *б* – вблизи внешней поверхности трубы (обр. №10 на рис. 2), *в* – на периферии медной дуги (обр. №3 на рис. 2).

после осаждения на нее покрытия по сравнению с ее состоянием до облучения.

Этот факт указывает на то, что в процессе оплавления ПС медной дуги происходило некоторое

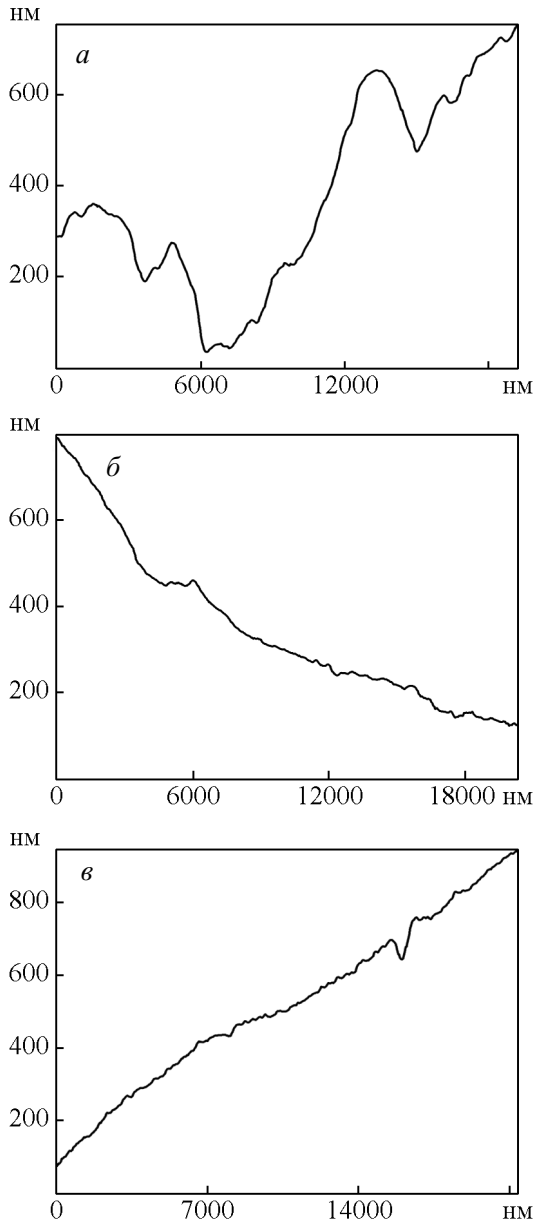


Рис. 5. Профиль участков поверхности медной дуги до облучения (*а*) и после облучения *ДП* и осаждения покрытия: *б* — вблизи внешней поверхности трубы (обр. №10 на рис. 2), *в* — на периферии медной дуги (обр. №3 на рис. 2).

сглаживание поверхностных неровностей, присутствовавших до облучения. В то же время топографическая структура поверхности в зоне центральной части Cu-дуги, подвергавшейся воздействию экстремальных потоков энергии с высокой плотностью мощности $q_i \approx 10^8$ Вт/см^2, была существенно более "грубой" по сравнению с исходным состоянием (рис. 6). Она содержала характерные для подобных условий облучения дефекты микроструктуры: капли, кратеры, наплывы и микротрещины.

Распределение элементов в покрытии

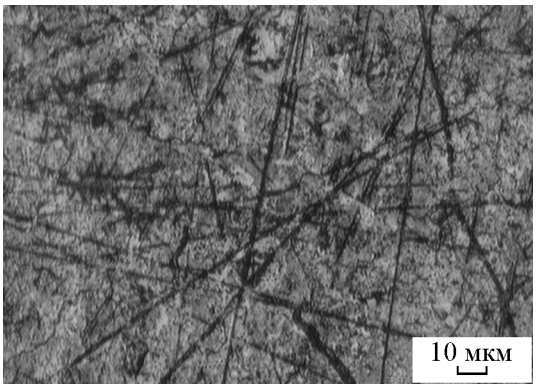
Содержание элементов в нанесенном на медь покрытии, определенное с помощью локального рентгеноспектрального анализа, приведено в табл. 1. Элементный состав определяли в трех точках, удаленных друг от друга на расстояние в несколько мм. Из табл. 1 видно, что состав покрытия достаточно однороден. Его основу составляет медь, а осажденные элементы стальной трубы находятся между собой примерно в таком соотношении, в масс. %: Fe — 60 – 62, Cr — 18 – 20, Mn — 12 – 16 %. Другими словами, концентрация осажденных элементов в покрытии отличается от их концентрации в исходном составе стали, главным образом, заметно повышенным содержанием Cr и пониженным содержанием Mn. Этот факт указывает на то, что испарение материала трубы с ее облученной наружной поверхности происходило по не кластерному механизму (который часто реализуется при испарении материала анода ПФ взрывным пучком электронов [10]), а по "ионно-атомному" механизму. Отмеченный результат можно рассматривать как преимущество использованного в данной работе метода осаждения покрытия, при котором образец в виде полой стальной трубы, служащий мишенью для испарения материала потоком плазмы, расположен в катодной зоне ПФ параллельно падающему потоку, по сравнению с распространенным методом испарения материала анода ПФ электронным пучком [14 – 16].

Таблица 1

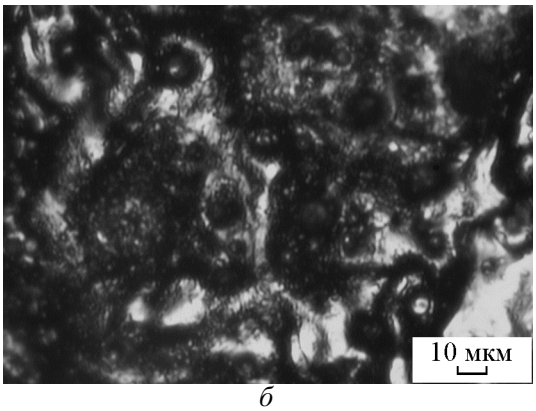
Содержание элементов в покрытии, осажденном на медную дугу (масс. %)

Элемент	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Cu	96,2	96,2	96
Fe	2,30	2,41	2,50
Cr	0,70	0,78	0,82
Mn	0,48	0,53	0,65
Si	0,27	0,08	0,03
V	0,05	—	—

Приведённые в табл. 1 величины концентрации элементов соответствуют усреднённому составу поверхностного слоя толщиной порядка 2 – 3 мкм, что существенно превышает толщину нанесённого покрытия. Для более детального исследования распределения элементов в покрытии использовали Оже-спектроскопию в сочетании с послойным ионным травлением. Съёмку Оже-спектров с



а



б

Рис. 6. Микроструктура поверхности (оптическая микроскопия) центральной части медной дуги до облучения (*а*) и после четырех импульсных воздействий потоков ионов дейтерия и ДП (*б*) в установке ПФ

поверхности облученных образцов проводили после ее предварительной очистки (травления) бомбардировкой ионами аргона в течение 10 с. Концентрационные кривые распределения элементов, построенные по результатам Оже-спектрального анализа для обр. № 10, представлены на рис. 7. Из рис. 7 видно, что в нанослое на поверхности меди присутствуют элементы стальной трубы (Fe, Mn, Cr, C), которые испарялись потоками ДП и осаждались на Cu-подложку, а также кислород как остаточный примесный элемент рабочего газа. Ход кривых на рис. 7, в основном, носит монотонный характер, но имеются и немонотонные участки, которые отражают сложный характер процесса осаждения покрытия при импульсном воздействии энергетических потоков. В целом же, как следует из рис. 7, концентрация осажденных элементов уменьшается по мере удаления от облученной поверхности вглубь материала. При этом наиболее сильное изменение хода кривых наблюдается вблизи поверхности в тонком слое толщиной ~ до 100 нм, который и характеризует толщину осажденного пленочного “нанопокрытия”.

Распределение температуры в покрытии

Методом численного моделирования [23], проведена оценка эволюции температуры в облученном поверхностном слое Cu-дуги после воздействия импульса ДП в зоне обр. № 10. Результаты численного анализа распределения температуры в рассматриваемом пленочном покрытии представлены на рис. 8. Из численных оценок, следует, что после однократного импульсного воздействия ДП расплавлялся слой меди толщиной $h \approx 2 - 3$ мкм, который находился в жидком состоянии очень короткое время, примерно 8 – 10 мкс. Рентгеновский фазовый анализ Cu дуги с осажденным на нее покрытием показал, что характер дифракционных линий после облучения остался практически неизменным, что указывает на

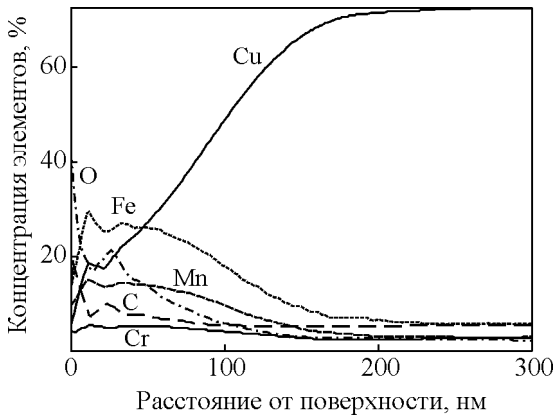


Рис. 7. Концентрационные кривые распределения элементов по толщине осажденного покрытия, построенные по результатам Оже спектрального анализа после импульсного воздействия дейтериевой плазмы.

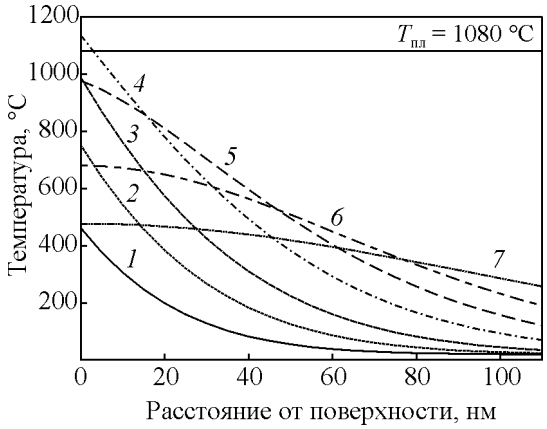


Рис. 8. Распределение температуры в поверхностном слое медной дуги для разных моментов времени, нс: *1* — 8, *2* — 12, *3* — 16, *4* — 22, *5* — 28, *6* — 36, *7* — 56, после однократного воздействия дейтериевой плазмы.

отсутствие образования новых соединений. Другими словами, время существования жидкой фазы на поверхности Cu-дуги после воздействия ДП оказалось недостаточным для образования химических соединений посредством взаимодействия осажденных на поверхность меди элементов с материалом подложки и между собой. Характер концентрационных кривых распределения элементов на рис. 7 свидетельствует о том, что осажденные элементы при температурах выше точки плавления Cu растворялись в расплаве, осуществляя его легирование. После затвердевания жидкой фазы с высокой скоростью (~ 10^7 град./с) на поверхности меди формировалось многокомпонентное пленочное покрытие, легированное испаренными элементами стали и кислородом. Если принять, что коэффициент диффузии осажденных элементов в жидкой меди равен $D \approx 5 \cdot 10^{-5}$ см^2/с [24], то характерная глубина их диффузионного переноса в расплаве за время его существования при однократном воздействии ДП $t \approx 10$ мкс составляет $x \approx (Dt)^{1/2} \approx 22{,}4 \cdot 10^{-6}$ см $\approx$ 224 нм. Эта численная оценка хорошо согласуется с экспериментальными концентрационными кривыми распределения элементов, представленными на рис. 7. Из рисунка видно, что максимальная глубина проникновения в поверхностный слой меди легирующих ее элементов составляет 200 – 250 нм. Немонотонный же ход кривых на рис.7 может быть связан с волнообразным рельефом поверхности Cu-дуги после облучения, а также с возможностью влияния на проникновение осажденных элементов вглубь материала не только диффузионного, но и конвективного механизма переноса.

Упрочнение пленочного покрытия

Результаты измерения механических характеристик — нанотвердости и модуля Юнга — рассматриваемого покрытия в сравнении с аналогичными параметрами для нанослоя на поверхности Cu-дуги в исходном состоянии представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что осажденное на медную подложку покрытие способствует заметному (более чем в два раза) увеличению нанотвердости, что указывает на существенное упрочнение модифицированного

нанослоя. При этом наиболее резкое изменение нанотвердости и модуля Юнга наблюдается в очень тонком слое (примерно 100 – 150 нм), который соответствует толщине нанесенного пленочного покрытия. Данное упрочнение материала связано с вышеуказанным легированием ПС меди осажденными элементами стальной трубы и кислородом, что способствовало после закалки расплава “твердорастворному упрочнению”, а также с образованием дисперсной микроструктуры. Возникающие в нанослое после облучения термические микронапряжения могут приводить к его дополнительному упрочнению.

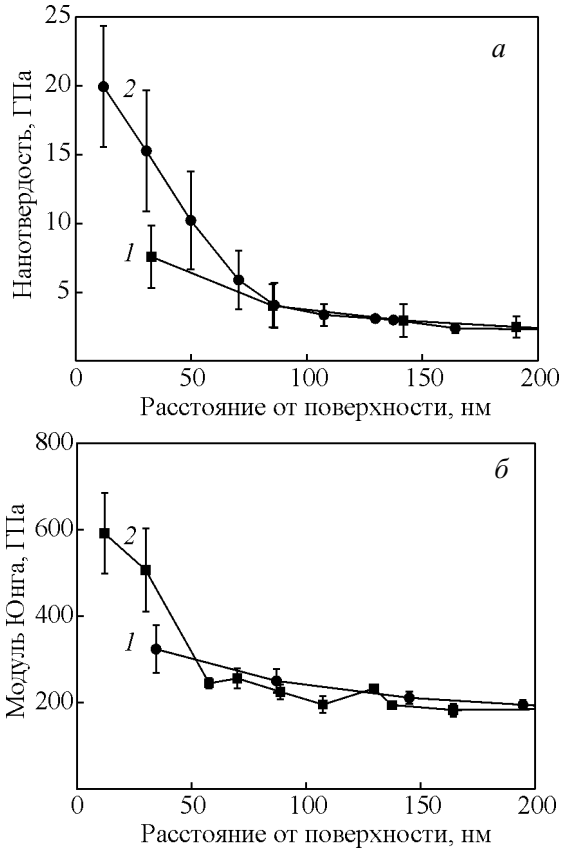


Рис.9 Изменение нанотвердости (*а*) и модуля Юнга (*б*) по глубине нанослоя на поверхности Cu-дуги в исходном состоянии (*1*) и после нанесения многокомпонентного пленочного покрытия в установке ПФ (*2*).

Выводы

1. Экспериментально исследована возможность использования установки Плазменный фокус для нанесения многокомпонентного тонкопленочного покрытия на металлическую подложку, расположенную в катодной зоне рабочей камеры ПФ, посредством испарения материала функционального образца-мишени, также расположенного в катодной области, мощными импульсными потоками ионов и высокотемпературной плазмы.

2. Показано, что облучение мишени в виде полой шестигранной трубы из хромомарганцевой аустенитной стали 25Х12Г20В, расположенной вдоль оси рабочей камеры ПФ, позволило нанести на подложку в форме медной дуги (закрепленной на холодном

торце трубы нормально к падающему потоку энергии) покрытие субмикронной толщины путем осаждения элементов указанной стали, испаряемых импульсными потоками дейтериевой плазмы и быстрых дейтронов.

3. Установлено, что нанесение покрытия по рассматриваемой методике сочетает облучение функционального образца-мишени мощными импульсными пучками энергии с непосредственным воздействием плазменных потоков на медную подложку при более низких значениях $q \approx 10^6$ Вт/см^2, что приводит к оплавлению поверхностного слоя меди и способствует процессу поверхностного жидкофазного легирования Cu-подложки и повышению адгезии между покрытием и основой.

4. Обнаружено, что структурное состояние нанесенного покрытия зависит от режима облучения и изменяется по мере удаления от оси рабочей камеры к периферийной зоне. В условиях проведенных экспериментов микроструктура на периферии медной дуги соответствует наноструктурному состоянию, в то время как в центральной зоне более интенсивного плазменного воздействия наблюдается более крупнозернистая структура — с характерным размером зерна порядка одного микрометра.

5. Определено, что механические характеристики (кинетическая нанотвердость и модуль Юнга), измеренные после осаждения покрытия на поверхность медной дуги, возрастают в поверхностном слое наноразмерного масштаба толщиной ~ 100 нм в несколько раз по сравнению с соответствующими исходными значениями для необлученной меди. Этот факт указывает на упрочнение поверхностного нанослоя меди, которое связано с его жидкофазным легированием элементами стальной трубы и кислородом, дисперсным характером микроструктуры закристаллизованного нанослоя, а также с действием термических микронапряжений.

6. Представленный метод нанесения многокомпонентных тонкопленочных покрытий является альтернативным по отношению к распространенному способу осаждения покрытий с использованием установок ПФ посредством испарения электронным пучком материала анода и последующего осаждения испаренного вещества на мишень, расположенную в катодной зоне. В рассмотренном нами методе реализован ионно-атомный механизм осаждения покрытия, в отличие от кластерного механизма, который, как правило, ухудшает однородность состава и свойств осаждаемого материала.

Авторы благодарны докторам М. Шольцу, Л. Карпинскому, М. Падуху и Э. Зелинской, а также всей группе сотрудников установки PF-1000, за возможность проведения экспериментов на этой установке в Институте физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава, Польша.

Настоящая работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант №16-08-00189) и Международным Агентством по Атомной Энергии (гранты IAEA CRP № 16954, 16955, 16956, 16960, 17167)

Литература

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Под ред. Б.А. Калина. М.: Круглый год, 2001, 528 с.
2. Фортов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю. Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества. Успехи физических наук, 2008, т. 178, № 2, с. 113 – 138.
3. Бойко В.И., Валяев А.Н. Погребняк А.Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц. УФН, 1999, т. 169, № 11, с. 1243 – 1271.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Сулима А.Н., Ягодкин Ю.Д. и др. Перспективы применения в авиадвигателестроении ионной технологии. Авиационная промышленность, 1992, № 9, www.viam.ru/public.
5. Углов В.В. Поверхностная обработка инструментальных сталей плазменными потоками квазистационарного ускорителя. Физика и химия обработки материалов, 2004, № 5, с. 44 – 49.
6. Anishchik V.M., Uglov V.V., Astashynski V.V., Astashynski V.M., Ananin S.I., Kostyukevich E.A., Kuzmitski A.M., Kvasov N.T., Danilyuk A.L., Rumianceva I.N. Compressive plasma flows interaction with steel surface: structure and mechanical properties of modified layer. Vacuum, 2003, v. 70(2), p. 269 – 274.
7. Ласковнев А.П., Черенда Н.Н., Басалай А.В., Углов В.В. и др. Модификация поверхностного слоя меди под действием компрессионного плазменного потока. Проблемы физики, математики и техники, 2013, № 3 (16), с. 24 – 29.
8. Kalin B.A., Volkov N.V., Yakushin V.L. Formation of a Gradient Structural-Phase State in Materials under a Radiation-Beam Action. Известия вузов. Физика. 2006, №8, Приложение, с. 202 – 206.
9. Калин Б.А., Якушин В.Л., Джумаев П.С. Разработка методов создания металлических материалов с наноструктурированным поверхностным слоем путем обработки потоками высокотемпературной импульсной плазмы. Физика и химия обработки материалов, 2010, №2, с. 21 – 27.
10. Иванов Л.И., Пименов В.Н., Грибков В.А. Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами. Физика и химия обработки материалов, 2009, № 1, с. 23 – 37.

11. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр “Академия”, 2005, 192 с.
12. Найдич Ю.В., Габ И.И., Костюк Б.Д., Стецюк Т.В., Куркова Д.И., Дукаров С.В. Нанопленки металлов в процессах соединения (пайки) керамических материалов. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2007, no. 5, p. 97 – 104.
13. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. Казанский государственный технологический. Университет, 2007, 365 с.
14. Rawat R.S., Zhang T., Thomas Gan K.S., Lee P., Ramanujan R.V. Nano-structured Fe thin film deposition using plasma focus device. Applied Surface Science, 2006, v. 253, p. 1611 – 1615.
15. Gupta R., Srivastava M.P. Carbon ion implantation on titanium for TiC formation using a dense plasma focus device. Plasma Sources Science and Technology, 2004, v. 13, p. 371 – 374.
16. Zhang T., Lin J., Patran A., Wong D., Hassan S.M., Mahmood S., White T., Tan T.L., Springham S.V., Lee S., Lee P., Rawat R.S. Optimization of a plasma focus device as an electron beam source for thin film deposition. Plasma Sources Science and Technology, 2007, v. 16, p. 250 – 256.
17. Колокольцев В.Н., Боровицкая И.В., Сиротинкин В.П., Никулин В.Я., Силин П.В., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Ерискин А.А., Дегтярев В.Ф. Напыление тонких пленок на диэлектрические подложки с использованием импульсной плазмы. Физика и химия обработки материалов, 2013, № 5, с. 51 – 57.
18. Пименов В.Н., Демина Е.В., Масляев С.А., Иванов Л.И. и др. Взаимодействие импульсных потоков ионов дейтерия и плотной плазмы с материалом трубы из малоактивируемой аустенитной стали в установке плазменный фокус. Перспективные материалы, 2007, № 2, с. 48 – 56
19. Демина Е.В., Иванов Л.И., Масляев С.А. Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Грибков В.А., Дубровский А.В. Модифицирование поверхностных слоев стальных труб импульсными потоками ионов и высокотемпературной плазмы. Перспективные материалы, 2008, № 5, с. 41 – 48.
20. Пименов В.Н., Демин А.С., Грибков В.А., Масляев С.А., Демина Е.В. и др. Использование мощных энергетических воздействий для создания модифицированных поверхностных нанослоев, Перспективные материалы, 2014, № 10, с. 40 – 52
21. Масляев С.А., Пименов В.Н., Грибков В.А., Демин А.С. Повреждаемость хромомарганцевых сталей импульсными потоками ионов и плотной плазмы при их раздельном воздействии на материал в установке Плазменный фокус. Перспективные материалы, 2011, № 1, 15 – 22.
22. Грибков В.А., Демин А.С., Демина Е.В., Дубровский А.В., Карпинский Л., Масляев С.А., Падух М., Пименов В.Н., Шольц М. Физические процессы, протекающие при взаимодействии импульсных ионных и плазменных потоков с поверхностью мишени в форме пластины и трубы в рабочей камере установки Плазменный фокус. Прикладная физика, 2011, № 3, с. 43 – 51.
23. Масляев С.А. Тепловые эффекты при импульсном облучении материалов в установке Плазменный Фокус. Перспективные материалы, 2007, № 5, с. 47 – 55.
24. Мысик Р.К., Брусницын С.В., Сулицин А.В., Ивкин М.О., Карпинский А.В. Особенности производства литых заготовок из медных сплавов. Вестник ЮУрГУ. 26 Серия “Металлургия”, 2014, т. 14, № 2, с. 26 – 34.

References

1. Gribkov V.A., Grigor’ev F.I., Kalin B.A., Jakushin V.L. *Perspektivnye radiacionno-puchkovye tehnologii obrabotki materialov* [Prospective radiation beam materials processing technologies]. Ed. Kalin BA. Moscow, Kruglyj god Publ., 2001, 528 p.
2. Fortov V.E., Hoffmann D., Sharkov B.Ju. Intensivnye ionnye puchki dlja generacii ekstremal’nyh sostojanij veshestva [Intense ion beams for generation of extreme states of matter]. *Uspekhi fizicheskih nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2008, vol. 178, no. 2, pp. 113 – 138.
3. Bojko V.I., Valjaev A.N. Pogrebnjak A.D. Modifikacija metallicheskih materialov impul’snymi moshhnymi puchkami chastic [Metal modification by high-power pulsed particle beams]. *Uspekhi fizicheskih nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1999, vol. 169, no. 11, pp. 1243 – 1271.
4. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Sulima A.N., Jagodkin Ju.D. i dr. Perspektivy primenenija v aviadvigatelestroenii ionnoj tehnologii [Prospects for use in aircraft engine ion technology]. *Aviacionnaja promyshlennost’ — Aviation Industry*, 1992, no. 9, www.viam.ru/public.
5. Uglov V.V. Poverhnostnaja obrabotka instrumental’nyh stalej plazmennymi potokami kvazistacionarnogo uskoritelja [Surface treatment of tool steels by plasma flows in quasi-stationary accelerator]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment* (in Russ), 2004, no. 5, pp. 44 – 49.
6. Anishchik V.M., Uglov V.V., Astashynski V.V., Astashynski V.M., Ananin S.I., Kostyukevich E.A., Kuzmitski A.M., Kvasov N.T., Danilyuk A.L., Rumianceva I.N. Compressive plasma flows interaction with steel surface: structure and mechanical properties of modified layer. Vacuum, 2003, vol.70, pp. 269–274.
7. Laskovnev A.P., Cherenda N.N., Basalaj A.V., Uglov V.V. i dr. Modifikacija poverhnostnogo sloja medi pod dejstviem kompressionnogo plazmennogo potoka [Modification of the surface layer of copper under the action of compression plasma stream]. *Problemy fiziki, matematiki i tehniki — Problems of physics and engineering mathematics*, 2013, no. 3 (16), pp. 24 – 29.
8. Kalin B.A., Volkov N.V., Yakushin V.L. Formation of a gradient structural-phase state in materials under a radiation-beam action. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedeny. Fizika — Russian Physics Journal, 2006, no. 8, pp. 202 – 206.

9. Kalin B.A., Jakushin V.L., Dzhumaev P.S. Razrabotka metodov sozdanija metallicheskih materialov s nanostrukturirovannym poverhnostnym sloem putem obrabotki potokami vysokotemperaturnoj impul'snoj plazmy [Development of methods for producing metallic materials with nanostructured surface layer by processing with the flow of high-temperature pulsed plasma]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment* (in Russ), 2010, no. 2, pp. 21 – 27.
10. Ivanov L.I., Pimenov V.N., Gribkov V.A. Vzaimodejstvie moshhnyh impul'snyh potokov jenergii s materialami. [The interaction of high-power pulsed energy flows with materials]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment* (in Russ), 2009, no. 1, pp. 23 – 37.
11. Andrievskij R.A., Ragulja A.V. *Nanostrukturnye materialy* [Nanostructured materials]. Moscow, Publishing Center Academy, 2005, 192 p.
12. Najdich Ju.V., Gab I.I., Kostjuk B.D., Stecjuk T.V., Kurkova D.I., Dukarov S.V. *Nanoplenki metallov v processah soedinenija (pajki) keramicheskih materialov* [Metal nanofilms in the process of connecting (soldering) of ceramic materials]. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2007, no. 5, pp. 97 – 104.
13. Abdullin I.Sh., Zheltuhin V.S., Sagbiev I.R. Shaehov M.F. *Modifikacija nanosloev v vysokochastotnoj plazme ponizhennogo davlenija* [Modification of nanolayers in the high-frequency low-pressure plasma]. Kazan State Technological University Publ., 2007, 365 p.
14. Rawat R.S., Zhang T., Thomas Gan K.S., Lee P., Ramanujan R.V. Nano-structured Fe thin film deposition using plasma focus device. Applied Surface Science, 2006, vol. 253, pp. 1611–1615.
15. Gupta R., Srivastava M. P. Carbon ion implantation on titanium for TiC formation using a dense plasma focus device. Plasma Sources Science and Technology, 2004, vol. 13, pp. 371–374.
16. Zhang T., Lin J., Patran A., Wong D., Hassan S.M., Mahmood S., White T., Tan T.L., Springham S.V., Lee S., Lee P., Rawat R.S. Optimization of a plasma focus device as an electron beam source for thin film deposition. Plasma Sources Science and Technology, 2007, vol. 16, pp. 250 – 256.
17. Kolokol'cev V.N., Borovickaja I.V., Sirotinkin V.P., Nikulin V.Ja., Silin P.V., Bondarenko G.G., Gajdar A.I., Eriskin A.A., Degtjarev V.F. Napylenie tonkih plenok na dijelektricheskie podlozhki s ispol'zovaniem impul'snoj plazmy [Deposition of thin films on dielectric substrates using a pulsed plasma]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment* (in Russ), 2013, no. 5, pp. 51 – 57.
18. Pimenov V.N., Demina E.V., Masljaev S.A., Ivanov L.I. et al. Vzaimodejstvie impul'snyh potokov ionov dejterija i plotnoj plazmy s materialom truby iz maloaktiviruemoj austenitnoj stali v ustanovke plazmennyj focus [Interaction of the flows of deuterium ion beems and dense plasma with the material of the tube of the low activation austenitic steel in plasma focus device]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2007, no. 2, pp. 48 – 56.
19. Demina E.V., Ivanov L.I., Masljaev S.A. Pimenov V.N., Sasinovskaja I.P., Gribkov V.A., Dubrovskij A.V. Modificirovanie poverhnostnyh sloev stal'nyh trub impul'snymi potokami ionov i vysokotemperaturnoj plazmy [Modification of the surface layers of steel tubes by pulsed ion beams and high-temperature plasma]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2008, no. 5, pp. 41 – 48.
20. Pimenov V.N., Demin A.S., Gribkov V.A., Masljaev S.A., Demina E.V. et al. Ispol'zovanie moshhnyh jenergeticheskih vozdejstvij dlja sozdanija modificirovannyh poverhnostnyh nanosloev [The use of powerful energy effects to produce a modified surface nanolayers]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2014, no. 10, pp. 40 – 52.
21. Masljaev S. A., Pimenov V. N., Gribkov V. A., Demin A. S. Povrezhdaemost' hromomargancevyh stalej impul'snymi potokami ionov i plotnoj plazmy pri ih razdel'nom vozdejstvii na material v ustanovke Plazmennyj fokus.[Chromium-manganese steels damage under pulsed ion beams and dense plasmas at their separate effects on the material in Plasma Focus device.] *Perspektivnye materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2011, no. 1, pp. 15 – 22.
22. Gribkov V.A., Demin A.S., Demina E.V., Dubrovskij A.V., Karpinskij L., Masljaev S.A., Paduh M., Pimenov V.N., Shol'c M. Fizicheskie processy, protekajushhie pri vzaimodejstvii impul'snyh ionnyh i plazmennyh potokov s poverhnost'ju misheni v forme plastiny i truby v rabochej kamere ustanovki Plazmennyj focus [Physical processes occurring under the interaction of pulsed ion and plasma flows with the surface of the target in the form of plate and tube in the chamber of Plasma Focus device]. *Prikladnaja fizika — Applied physics*, 2011, no. 3, pp. 43 – 51.
23. Masljaev S.A. Teplovye jeffekty pri impul'snom obluchenii materialov v ustanovke Plazmennyj Fokus [Thermal effects during pulsed irradiation of materials in the Plasma focus device]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2007, no. 5, pp. 47 – 55.
24. Mysik R.K., Brusnicyn S.V., Sulicin A.V., Ivkin M.O., Karpinskij A.V. Osobennosti proizvodstva lityh zagotovok iz mednyh splavov [Features of production of castings made of copper alloys]. *Vestnik JuUrGU. 26 Serija, Metallurgija — Bulletin of SUSU. 26 Series Metallurgy*, 2014, vol. 14, pp. 2, pp. 26 – 34.

Статья поступила в редакцию 2.02.2016 г.

Морозов Евгений Викторович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), младший научный сотрудник, специалист в области материаловедения. E-mail: maslyaev@mail.ru.*

Масляев Сергей Алексеевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук. Специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: maslyaev@mail.ru.*

Демин Александр Сергеевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), младший научный сотрудник, специалист в области материаловедения. E-mail address: casha@bk.ru*

Пименов Валерий Николаевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук. Специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: pimval@mail.ru*

Грибков Владимир Алексеевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), ведущий научный сотрудник, профессор, доктор физико-математических наук. Специалист в области экспериментальной физики плотной плазмы. E-mail: gribkovv@rambler.ru*

Демина Елена Викторовна *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: elenadyom@mail.ru*

Лазарев Эдуард Михайлович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Скончался в 2015 г.*

Гордеев Александр Семенович *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), старший научный сотрудник, специалист в области рентгеноструктурного анализа и Оже-спектроскопии. E-mail: shamray@imet.ac.ru*

Сасиновская Ирина Порфирьевна *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), научный сотрудник, специалист в области материаловедения и металлографии. E-mail address: porfirievna@mail.ru.*

Ляховицкий Марк Матвеевич *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49), старший научный сотрудник, кандидат технических наук, специалист в области теплофизики и материаловедения. E-mail: markl@yandex.ru.*

Синицына Ольга Валентиновна *— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова РАН научный сотрудник (119334, Москва, ул. Вавилова, д. 28), кандидат химических наук, специалист в области сканирующей зондовой микроскопии и литографии. E-mail: sinitsyna@gmail.com.*

Deposition of multicomponent film-like coating on metal substrate using plasma focus device

E. V. Morozov, S. A. Maslyaev, A. S. Demin, V. N. Pimenov, V. A. Gribkov, E. V. Dyomina, E. M. Lazarev, A. S. Gordeev, I. P. Sasinovskaya, M. M. Lyakhovitsky, O. V. Sinitsyna

Results of the investigation of multicomponent coating deposition on metal substrate in cathode part of the Dense Plasma Focus device have been presented. The features of the processes accompanying the coating have been considered: evaporation of elements of chromium-manganese austenite steel tube, which was located along the axis of Plasma focus PF-1000 chamber, under high temperature dense deuterium plasma and deposition of the elements on the model material in form of copper arc. It have been shown that in the realized exposure mode (the power density of the plasma flow $q_p = 10^8 – 10^9$ W/cm^2 in the zone of its impact on the tube and $q_p = 10^6$ W/cm^2 in the region of interaction of the plasma with the copper substrate) the proposed method allows to obtain the coating of submicron thickness on the substrate surface, which includes the evaporated elements of the steel tube. Combined action of powerful streams of fast deuterons and hot plasma in the central part of the copper arc was examined. The structural state, elemental composition, mechanical characteristics and possible mechanisms for hardening of the deposited film coating have been discussed.

Key words: Plasma focus, multicomponent film-like coating, Auger spectroscopy, nanohardness, modification of the surface nanolayer.

Morozov Evgeniy *— A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), junior research worker, specialist in nanomaterials. E-mail address: lieutenant@list.ru.*

Maslyaev Sergey *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), PhD (phys-math), senior research worker, specialist in radiation and space materials science. E-mail address: maslyaev@mail.ru.*

Demin Aleksandr *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), research worker, specialist in materials science. E-mail: casha@bk.ru.*

Pimenov Valeriy *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), DrSci (Phys-Math), head of laboratory, specialist in radiation and space materials science. E-mail: pimval@mail.ru.*

Gribkov Vladimir *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (23 Hery Str., 01-497 Warsaw, Poland), DrSci (Phys-Math), leading research worker, professor, specialist in experimental physics and dense plasma. E-mail address: gribkovv@rambler.ru.*

Demina Elena *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), PhD, leading research worker, specialist in radiation and space materials science. E-mail address: elenadyom@mail.ru.*

Lazarev Eduard *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS. Died in 2015.*

Gordeev Aleksandr *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), research worker, specialist in X-ray analysis and Auger spectroscopy. E-mail address: shamray@imet.ac.ru.*

Sasinovskaya Irina *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), research worker, specialist in material science and metallography. E-mail: porfirievna@mail.ru.*

Lyahovitskiy Mark *— A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS (49 Leninskii pr., Moscow 119334, Russia), PhD (Eng), senior research worker, specialist in thermal physics and material science. E-mail: mark.oldmark@gmail.com.*

Sinitsyna Olga *— A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of RAS (119991 Moscow, Vavilova st., 28), PhD (Chem), senior research worker, specialist in scanning probe microscopy and lithography. E-mail: sinitsyna@gmail.com.*