

Повреждаемость хромомарганцевых сталей импульсными потоками ионов и плотной плазмы при их раздельном воздействии на материал в установке Плазменный фокус

С. А. Масляев, В. Н. Пименов, В. А. Грибков, А. С. Демин

Экспериментально исследованы два способа разделения потоков горячей плазмы и быстрых ионов в пространстве и во времени в установке Плазменный фокус (ПФ). В первом случае, в традиционной геометрии эксперимента, используются различные расстояния от фокуса до мишени. Потоки ионов и плазмы генерируются в различные моменты времени, двигаются с разными скоростями и падают нормально к поверхности мишени-образца хромомарганцевой стали. В этой ситуации процессы расплавления и испарения поверхностного слоя сопровождаются имплантацией в него ионов рабочего газа и перераспределением элементов. Во втором случае разделение потоков плазмы и ионов происходит внутри полости протяженной стальной трубы за счет различных механизмов транспортировки внутри нее квазинейтральной плазмы и пучка быстрых заряженных ионов. Данный способ позволяет выделить в импульсном разряде ионный поток большой плотности мощности $\sim 10^9 - 10^{10}$ Вт/см². Отмечено, что повреждаемость наружной поверхности трубы с увеличением расстояния от фокуса монотонно уменьшается, в то время как повреждаемость материала вдоль внутренней стенки трубы носит немонотонный характер. Обсуждены причины аномально высокой повреждаемости кольцевой области внутренней поверхности трубы потоком высокоэнергичных ионов.

Ключевые слова: импульсный поток ионов и плазмы, повреждаемость поверхности, установка Плазменный фокус, протяженная стальная труба.

Two ways of temporal and space separation of hot plasma flux and fast ions in Plasma Focus device have been investigated experimentally. In the first case, in ordinary geometry of experiment, various distances from focus to a target were used. Ion and plasma fluxes were generated in different time, had different speeds and fall normally to a target surface. In this situation the melting and evaporation processes were accompanied by ion implantation and redistribution of elements in the surface layer. In the second case division of plasma and ion fluxes occurs inside of an extended steel tube due to different transport mechanisms for quasi-neutral plasma and the fast ion beam. This way allows to allocate in the pulse discharge the ion beam of high power density (approximately $10^9 - 10^{10}$ W/sm²). The damage of an external surface of the tube monotonously decreased with increase in distance from a source of radiations, while the damage of a material along an internal wall of the tube had non-monotonic character. The reasons of abnormal high damage of some area on internal surface of the tube by high energy ions beam were discussed.

Keywords: pulse ion and plasma beam, the surface damage, plasma Focus device, elongated steel tube.

Введение

В работах [1 – 7] было показано, что облучение импульсными потоками ионов (ИПИ) и высокотемпературной плазмой (ВТП) материала или изделия в установках типа плазменных ускорителей позволяет осуществлять мощное воздействие энергии на

облучаемый поверхностный слой (ПС), изменять его состав, структуру и свойства. При оптимальном выборе режима облучения можно получать модифицированный ПС с улучшенными механическими и коррозионными характеристиками, а также с более высокой радиационной стойкостью облучаемого материала. В работах [8, 9] было впервые показано,

что, используя установку ПФ, можно модифицировать не только наружный ПС обрабатываемого изделия, но и его труднодоступные участки. В частности, на примере облучения шестигранных полых труб, изготовленных из малоактивируемой аустенитной стали и располагаемых вдоль оси камеры ПФ напротив анода, была продемонстрирована возможность создания упрочненного модифицированного ПС не только вдоль наружной поверхности, но и во внутренней, достаточно протяженной полости трубы. Происходящие при этом изменения структурно-фазового состояния сплава и топологии облученной поверхности в сочетании с возможностью ионно-плазменного легирования поверхностных слоев открывают новые перспективы для улучшения механических и физико-химических свойств материала.

Такая возможность обработки труднодоступных участков деталей (в нашем случае — внутренних поверхностей трубы) связана с тем обстоятельством, что в ПФ, в отличие от других применяемых в материаловедении плазменных устройств, генерируется плазма с очень высокой температурой (порядка 10 миллионов градусов) [10]. Эта горячая плазма очень быстро расширяется (со скоростями $> 10^7$ см/с — порядка трансляционных скоростей плазменного сгустка), заполняя указанные труднодоступные полости. При этом в случае осевого расположения трубы мощность облучения и, следовательно, степень радиационного воздействия на обе поверхности (внутреннюю и внешнюю), очевидно, плавно уменьшаются по мере удаления участков трубы от анода рабочей камеры установки.

Вместе с тем, в работе [9] отмечалось, что на внутренней поверхности облученной стальной трубы состава 10Cr12Mn20W имеется кольцевая зона шириной примерно 6 см и отстоящая от “горячего” среза трубы на расстоянии $\sim 2/3$ от общей длины трубы, в которой наблюдается резкое усиление повреждаемости. Аналогичный эффект имел место в наших экспериментах со стальной трубой состава 25Cr12Mn20W [8]. На внешней стороне труб такой эффект отсутствовал.

Нам представляется, что указанный факт “аномально высокой повреждаемости” определенного участка внутренней полости изделия по сравнению с ее повреждаемостью на более близком расстоянии от источника излучения связан со спецификой взаимодействия импульсных потоков энергии внутри камеры ПФ с материалом протяженной полый мишени, расположенной вдоль оси камеры. Этот вопрос заслуживает специального рассмотрения.

Цель настоящей работы — исследование повреждаемости различных участков внутреннего и наружного ПС шестигранных труб составов 25Cr12Mn20W и 10Cr12Mn20W импульсными потоками высокоэнергичных ионов дейтерия с энергией $E_i \geq 100$ кэВ и дейтериевой плазмы (ДП) с энергией $E_p \approx 0,3 - 1,0$ кэВ и скоростями движения $> 10^7$ см/с.

Условия эксперимента

Геометрия экспериментов по облучению труб указанных составов на установке ПФ-1000 [8, 9], была неизменной. Эксперименты проводили при аксиальном расположении труб в рабочей камере установки ПФ напротив анода вдоль продольной оси камеры Z. Таким образом, потоки ионов и ДП падали касательно к поверхностям этих труб.

Расстояние от поверхности анода до переднего среза трубы равнялось 14 см при длине пинча вдоль оси Z около 8 – 10 см. Методика экспериментов и режимы облучения изложены в работах [8, 9]. Схема расположения анализируемых образцов вдоль трубы представлена на рис. 1.

Результаты и обсуждение

Повреждаемость внутренней полости трубы

Визуальный анализ внутренних полостей стальных труб, облученных потоками ионов и плотной ДП, показал, что на расстоянии $L_0 \approx 22$ см от ближайшего к аноду ПФ среза трубы наблюдается кольцеобразная зона шириной $\sim 6 - 7$ см с аномально высокой



Рис. 1. Схема расположения анализируемых образцов вдоль трубы.

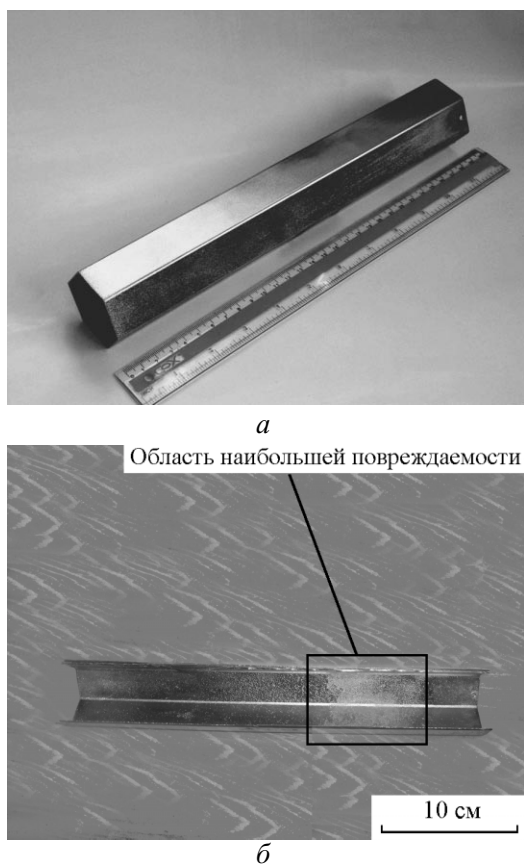


Рис. 2. Фотографии облученной трубы состава 25Cr12Mn20W после 4 импульсов воздействия потоков ионов дейтерия и ДП в установке ПФ-1000: *a* — наружная поверхность, *б* — внутренняя полость. “Горячий” торец трубы — слева.



Рис. 3 Фотография зоны anomalously высокой повреждаемости внутренней поверхности облученной трубы состава 25Cr12Mn20W после 4 импульсов воздействия потоков ионов дейтерия и ДП в установке ПФ-1000. “Холодный” конец трубы — справа (оптическая микроскопия).

повреждаемостью ПС по сравнению с остальными участками трубы (рис. 2 и 3). Топология поверхности в этой зоне заметно отличается от характера рельефа ПС в других участках существенно большим масштабом неровностей сформировавшихся структурных фрагментов и их необычной формой, напоминающей скорее не округлые капли, а “комки” произвольной

геометрии (рис. 3 и рис. 4б обр. №11). Эта особенность наблюдалась как для трубы состава 25Cr12Mn20W, так и состава 10Cr12Mn20W. Данный эффект anomalously высокой повреждаемости сплава может быть связан со следующим обстоятельством.

Струток плотной ДП, распространяющейся во внутренней полости облучаемой трубы со скоростью $\approx 3 \cdot 10^7$ см/с [10], — квазинейтральный. Однако высокоэнергичные быстрые ионы, движущиеся со скоростью $\approx 3 \cdot 10^8$ см/с (энергия $E \geq 100$ кэВ) в направлении мишени-катода [11], являются заряженными частицами. Они образуются позже плазменного потока, несут ток, и, кроме того, распространяются по отношению к “фоновой” плазме, как видно из приведенных значений, с большей скоростью. В некоторый момент времени быстрые ионы, распространяясь внутри трубы, начинают обгонять передний фронт плазменного пучка. Пучок ионов дейтерия, опережающий фронт плазмы и положительно заряженный относительно катода (и трубы), в процессе нарастания величины тока этого пучка наводит в трубе “обратный ток” (на самом деле попутный ионному пучку ток электронов). Когда диссипация в трубе этого обратного тока оказывается велика, ток быстрых ионов устремляется по направлению к трубе. При этом ионы дейтерия, опережающие плазму, отклоняются от первоначального направления движения (вдоль оси рабочей камеры ПФ с небольшим углом расхождения < 10 град), и происходит интенсивная бомбардировка внутренней поверхности трубы дейтонами высокой энергии. Этот эффект должен приводить к очень высокой повреждаемости материала в этой зоне по крайней мере по двум причинам.

Во-первых, энергия быстрых ионов, плотность потока которых весьма велика, примерно на два порядка величины превышает среднюю энергию частиц в плазме (~ 1 кэВ). Во-вторых, воздействие быстрых ионов на внутренний ПС трубы в рассматриваемом эффекте происходит под значительно большим углом к облучаемой поверхности, чем при касательном движении потока энергии вдоль неё. Судя по протяженности зоны anomalously высокой повреждаемости (более 6 см), процесс рассыпания ионного пучка на стенки трубы занимал порядка 0,1 мкс.

По топографии же поврежденной поверхности можно заключить, что процесс эрозии ПС носил взрывной характер, который для материалов типа сталей реализуется, как правило, при плотности мощности излучения $q = 10^9 - 10^{10}$ Вт/см² [12]. В этих условиях испарение ПС носило преимущественно кластерный характер и сопровождалось “пересаж-

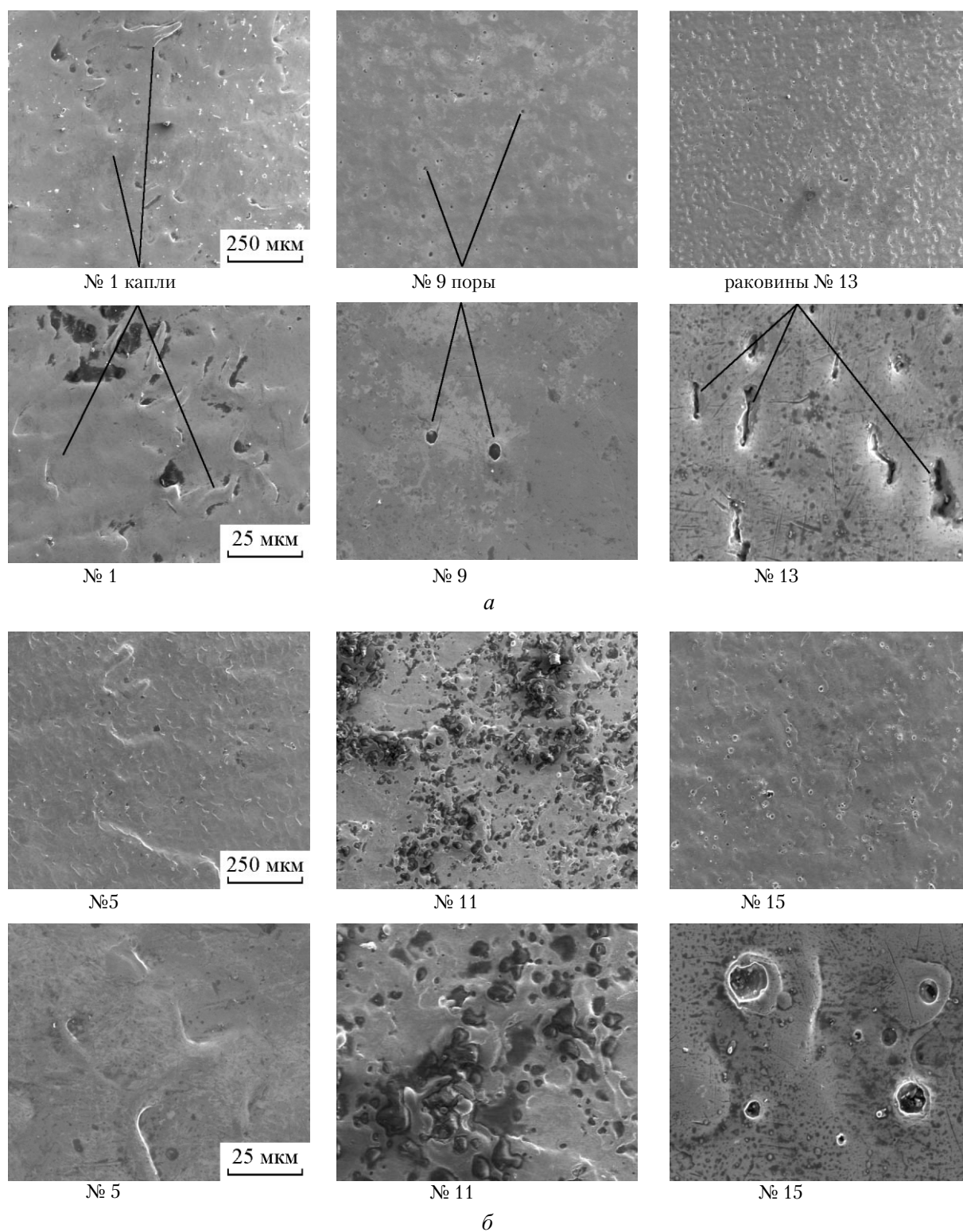


Рис. 4. Изменение характера повреждаемости поверхности вдоль трубы 25Cr12Mn20W после воздействия 4 импульсов ДП (*а* — наружная поверхность, *б* — внутренняя поверхность): образец № 1 — горячий торец трубы, № 5 — горячая зона, № 9 — центральная часть, № 11 — зона максимальной повреждаемости, № 13, 15 — холодная часть трубы (сканирование во вторичных электронах).

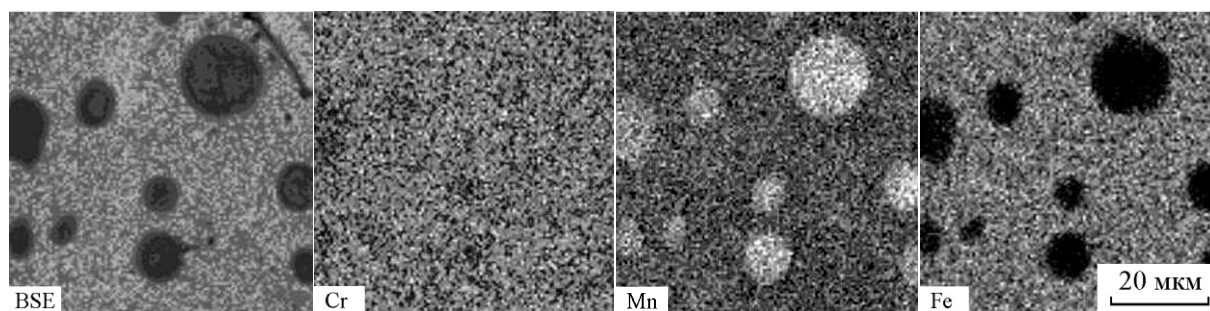


Рис. 5. Сканирование в обратно рассеянных электронах (BSE) и в характеристическом рентгеновском излучении компонентов стали Cr, Mn и Fe участка поверхности образца стали 10Cr12Mn20W после 3-х кратного импульсного воздействия потока быстрых ионов водорода и водородной плазмы в установке ПФ-1000.

дением” испаренных кластеров на различные участки внутренней поверхности труб с образованием при последующей кристаллизации расплава сложного поверхностного рельефа.

В целом, рассматриваемое явление требует более детального анализа физических процессов распространения в камере ПФ ионного и плазменного потоков, а также ударной волны, движущейся перед плазмой, и их воздействия на материал трубы. Такой анализ выходит за рамки тематики данной статьи и будет дан в подготовленной для публикации статье соответствующего профиля.

Следует заметить, что разделение ионного и плазменного потоков в камере ПФ может влиять не только на изменение характера повреждаемости поверхности, но также и на распределение элементов в ПС. Ранее, в работах [3, 13, 14], мы отмечали, что указанное разделение энергетических потоков в камере ПФ в пространстве и во времени приводит к необычному характеру повреждаемости ПС и распределения элементов в ПС стали 10Cr12Mn20W для случая нормального расположения образца-мишени по отношению к падающему потоку энергии.

Из рис. 5 видно, что после облучения стали 10Cr12Mn20W произошло заметное перераспределение компонентов в облученном материале: в местах расположения пузырей наблюдается увеличение содержания Mn и снижение содержания Fe. Однако, в отличие от вышерассмотренных экспериментов со стальными трубами, в приведенных экспериментах плотность мощности рассеянного потока ионов водорода, падавшего нормально на плоскость мишени, была небольшой [3, 13]. Это было связано с тем, что из-за значительного удаления облученной поверхности от источника излучения (более чем на 60 см) до нее долетали только ионы очень высоких энергий (сотни кэВ и порядка 1 МэВ), двигавшиеся

вблизи оси рабочей камеры, так как основная масса ионов, пройдя фронт плазмы, должна направиться по кратчайшей траектории к катодным стержням камеры ПФ. В этих условиях происходила имплантация ионов рабочего газа в материал, и в ПС создавались радиационные дефекты типа каскадов атомных столкновений и вакансионных кластеров (микропор) [15]. Последующее термическое воздействие плазмы (примерно через 6 – 8 мкс после воздействия потока ионов) приводило к образованию и росту пузырей в объеме жидкой фазы за счет испарения в микропоры паров марганца как наиболее летучего компонента, входящего в состав исследуемых сталей. На стадии кристаллизации расплава в ПС формировались блистеры, обогащенные марганцем (рис. 5) или кратеры [3, 13, 14].

Повреждаемость наружной поверхности трубы

Процесс значительного разделения ионной и плазменной компонент потока энергии в пространстве из-за различия их скоростей движения и характера распространения протекает не только внутри трубы, но и с ее внешней стороны. Так как плотность потока ионов вне трубы значительно ниже, чем вблизи оси камеры, то есть внутри трубы, а также из-за рассеяния указанных потоков в объеме рабочей камеры ПФ, эффект “внешней ионной бомбардировки” наружного ПС трубы проявляется значительно слабее. Его проявление удастся экспериментально зафиксировать по специфическому характеру поверхностных структурных дефектов, наблюдаемых в наружном ПС трубы 25X12Г20В на различном расстоянии от горячего торца трубы.

Обращает на себя внимание изменение характера повреждаемости (рельефа поверхности и микроструктуры ПС) вдоль внешней поверхности трубы (рис. 4а). Так, если в горячей зоне облученная

поверхность имеет преимущественно каплеобразный рельеф, то в центральной части трубы содержится множество пор, а в холодной зоне (область расположения обр. № 13, 14 на рис. 3), помимо пор, наблюдаются достаточно протяженные раковины длиной ~ 10 мкм. Это изменение повреждаемости и структурных дефектов ПС, происходящее по мере удаления от источника излучения, отражает различный характер взаимодействия потоков ионов и ДП с наружной поверхностью трубы, как с точки зрения термического влияния, так и реализуемых радиационных условий. Существенную роль в формировании поверхностных структурных дефектов в рассматриваемых условиях воздействия импульсов энергии на материал играет образование летучих газовых соединений в расплаве ПС [3]. Основу летучих компонентов составляют соединения имплантированного дейтерия с углеродом и остаточным кислородом стали, а также содержащийся в ней марганец. На стадии разогрева, охлаждения и затвердевания жидкой фазы газовые пузыри, образующиеся в расплаве, интенсивно удаляются из ПС через облучаемую поверхность (расплав “кипит”). Результаты анализа распределения марганца вдоль стенки трубы [8] (рис. 6) показывают, что его роль в образовании наблюдаемых дефектов типа пор (в центральной и хвостовой части трубы) была особенно существенна. Из рис. 6 видно, что концентрация марганца $C(\text{Mn})$ вдоль наружной поверхности облученной трубы уменьшается в направлении от горячего торца (при $L = 0$) к холодному, и значения $C(\text{Mn})$ оказываются заметно ниже, чем соответствующие значения в зоне внутренней поверхности трубы (где величина $C(\text{Mn})$ соответствует исходному содержанию Mn в стали).

При этом на горячем участке трубы различие составляет около 4%, а с ростом L (по мере удаления от анода ПФ) достигает $\sim 7-8\%$ (рис. 6). Этот факт, на первый взгляд, представляется неожиданным, так как с увеличением расстояния от анода ПФ плотность мощности энергетического потока, воздействующего на мишень-катод, как правило, снижается из-за его рассеяния в объеме камеры, а повреждаемость поверхности соответственно уменьшается. Однако, как показывает анализ, можно проследить корреляцию между характером повреждаемости наружного ПС и образования поверхностных структурных дефектов, с одной стороны, и спецификой взаимодействия ионных и плазменных потоков с различными зонами облучаемой трубы — с другой.

В горячей зоне интенсивность воздействия потоков энергии на материал весьма высока (плотность мощности излучения $q \approx 10^8 - 10^9$ Вт/см² для

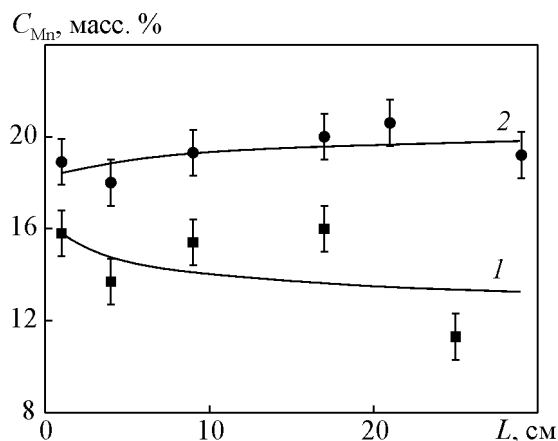


Рис. 6. Концентрационные кривые распределения марганца по длине поверхностного слоя облученной стальной трубы 25Cr12Mn20W: 1 — наружная поверхность, 2 — внутренняя поверхность (локальный рентгено-спектральный анализ).

обр. №1), а длительность существования жидкой фазы τ_0 на поверхности с учетом образования вторичной плазмы порядка сотни микросекунд [16]. Испарение компонентов из расплавленного слоя в этих условиях носит не селективный, а взрывной, преимущественно “кластерный” характер, при котором не происходит существенного изменения состава после частичного удаления с поверхности жидкой фазы. При этом часть пузырей, возникших в расплаве, удаляется из него вместе с испаренным ПС, а пузыри, оставшиеся в объеме, способствуют образованию пор на стадии затвердевания жидкости. После облучения топографический характер поверхности в этой зоне представляет собой каплеобразный рельеф, содержащий поры (рис. 4а).

В центральной части трубы интенсивность воздействия на материал аксиальных потоков ионов дейтерия и ДП из-за рассеяния энергии снижается, а толщина расплавленного ПС становится значительно меньше, чем в горячей части трубы [8]. В этих условиях реализуется преимущественное испарение из ПС более летучего Mn по сравнению с другими элементами, входящими в состав стали, и этот процесс происходит, главным образом, посредством удаления газовых пузырей из микрообъемов расплавленного ПС. Этот факт способствует образованию пор, которые наблюдаются на поверхности образцов в рассматриваемой зоне трубы (обр. №9 на рис. 4а).

В холодной части трубы интенсивность воздействия на ее стенку касательных потоков ионов дейтерия и ДП еще больше снижается, а толщина расплавленного ПС уменьшается до единиц мкм [8]. Падение в нем содержания Mn по сравнению с его концентрацией в центральной части трубы (рис. 6)

указывает на преимущественное испарение Mn в данной зоне облучения по сравнению с другими элементами стали. Наличие многочисленных микро-раковин на поверхности (обр. №13 на рис. 4а), сформировавшихся, по-видимому, в процессе прокатки и не “залеченных” при неглубоком расплавлении ПС, способствовало интенсивному удалению Mn из объема материала.

Следует отметить, что во внутренней полости трубы, в аналогичной ситуации (в самом “холодном” образце № 15), наблюдаются не раковины, а поры диаметром от нескольких до ~ 15 – 20 мкм (рис. 4б). Очевидно, что температурные условия формирования структурно-фазового состояния ПС в сопоставляемых условиях облучения (для наружной и внутренней поверхности трубы в холодной части) существенно отличались друг от друга. В процессе более глубокого проплавления внутреннего ПС газообразная фракция удалялась из жидкой фазы с образованием на стадии быстрой кристаллизации расплава поверхностных микропор.

Выводы

1. Продемонстрированы два способа разделения в установке ПФ импульсных потоков горячей плазмы и быстрых ионов в пространстве и во времени. В первом случае для рассматриваемого разделения потоков,двигающихся с разными скоростями нормально к плоскости облучения, изменяются расстояния от источника излучения до образцов-мишеней. Это приводит к различному характеру повреждаемости материала. Во втором случае разделение указанных потоков происходит внутри полости протяженной стальной трубы за счет различных механизмов транспортировки внутри нее квазинейтральной плазмы и пучка быстрых заряженных ионов.

2. Показано, что при импульсном касательном воздействии потоков ионов и плотной плазмы на протяженную мишень в форме шестигранной полой трубы из хромомарганцевой стали, расположенной в катодной части установки ПФ вдоль оси потока энергии, повреждаемость наружной поверхности мишеней с увеличением расстояния от источника излучения монотонно уменьшается. В тоже время повреждаемость внутренней полости трубы носит немонотонный характер. Немонотонность указанного явления определяется более высокой скоростью движения высокоэнергичных ионов по сравнению со скоростью сгустка плазмы и интенсивной “ионной бомбардировкой” кольцевой зоны

полости трубы в процессе “высыпания” на нее пучка положительно заряженных высокоэнергичных ионов.

Авторы выражают благодарность за поддержку данной работы Международным Агентством по Атомной Энергии (грант IAEA CRP №14540) и Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант №.10-08-00333-а).

Литература

1. Масляев С.А., Пименов В.Н., Платов Ю.М., Демина Е.В. и др. Воздействие импульсов дейтериевой плазмы на материалы термоядерных реакторов в установке Плазменный фокус. Перспективные материалы, 1998, № 3, с. 39 – 46.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М.: Круглый год, 2001, 528 с.
3. Пименов В.Н., Грибков В.А., Иванов Л.И., Шольц М. и др. О новых возможностях применения установок Плазменный фокус для модифицирования поверхностных слоев материалов. Перспективные материалы, 2003, № 1, с. 13 – 23.
4. Gribov V.A., Pimenov V.N., Ivanov L.I., Dyomina E.V., Maslyayev S.A., Miklaszewski R., Scholz M., Ugaste U.E., Doubrovsky A.V., Mezzetti F., Kulikauskas V.C., Zatekin V.V. Interaction of High Temperature Deuterium Plasma Streams and Fast Ion Beams with Condensed Materials in Dense Plasma Focus Device, Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, v. 36, p. 1817 – 1825.
5. Якушин В.Л. Модифицирование углеродистых и низколегированных сталей потоками высокотемпературной импульсной плазмы. Металлы, 2005, № 2, с. 12 – 24.
6. Якушин В.Л., Калинин Б.А., Джумаев П.С. и др. Повышение коррозионной стойкости стали ЭП-823 в жидком свинце путем ее обработки потоками высокотемпературной импульсной плазмы. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 2005, т. 86, № 3, с. 128 – 130.
7. Пименов В.Н., Масляев С.А., Демина Е.В., Иванов Л.И. и др. Воздействие импульсных потоков энергии на поверхность трубы из алюминиевого сплава в установке плазменный фокус. Перспективные материалы, 2006, № 4, с. 43 – 52.
8. 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.
9. 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 высокотемпера-

- турной плазмы. Перспективные материалы, 2008, №5, с. 1 – 7.
10. Gribkov V.A., Bienkowska B., Borowiecki M., Dubrovsky A.V., Ivanova-Stanik I., Karpinski L., Miklaszewski R.A., Paduch M., Scholz M., Tomaszewski K. Plasma dynamics in PF-1000 device under full-scale energy storage: I. Pinch dynamics, shock-wave diffraction, and inertial electrode. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, v. 40, p. 1977 – 1989.
11. Gribkov V.A., Banaszak A., Bienkowska B., Dubrovsky A.V., Ivanova-Stanik I., Jakubowski L., Karpinski L., Miklaszewski R.A., Paduch M., Sadowski M.J., Scholz M., Szydlowski A., Tomaszewski K. Plasma dynamics in PF-1000 device under the full-scale energy storage: II. Fast electrons and ions characteristics versus neutron emission parameters, and the gun optimization properties. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, v. 40, p. 3592 – 3607.
12. Грибков В.А., Демина Е.В., Дубровский А.В., Иванов Л.И. и др. Воздействие импульсных потоков плотной дейтериевой и водородной плазмы на ферритные и аустенитные стали в установке плазменный фокус. Перспективные материалы, 2008, № 1, с. 16 – 25.
13. Pimenov V.N., Dyomina E.V., Ivanov L.I., Maslyaev S.A. et al. Damage of Structural materials for fusion devices under pulsed ion and high temperature plasma beams. Journal of Nuclear Materials, 2002, v. 307 – 311, part 1, p. 95 – 99.
14. Pimenov V.N., Maslyaev S.A., Ivanov L.I., Dyomina E.V. et al. Surface and bulk processes in materials induced by pulsed ion and plasma beams at Dense Plasma Focus devices. Nukleonika, 2006, v. 51, no. 1, p. 71 – 78.
15. Заболотный В.Т., Иванов Л.И., Суворов А.Л. Автоионная микроскопия и фундаментальные аспекты радиационной повреждаемости твёрдых тел. Физика и химия обработки материалов, 1994, № 2, с. 5 – 9.
16. Масляев С.А. Тепловые эффекты при импульсном облучении материалов в установке Плазменный Фокус. Перспективные материалы, 2007, № 5, с.47 – 55.
17. Gribkov V.A. Dense Plasma Focus as a Tool for Material Science and Technology. J. Moscow Phys. Soc., 1993, v. 3, no. 3, p. 231 – 234.

Масляев Сергей Алексеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник. Специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: maslyaev@list.ru.

Пименов Валерий Николаевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией. Специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: pimval@mail.ru.

Грибков Владимир Алексеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник. Специалист в области экспериментальной физики плотной плазмы. E-mail: gribkovv@yahoo.com.

Демин Александр Сергеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, младший научный сотрудник, аспирант Московского государственного индустриального университета.