

Использование мощных энергетических воздействий для создания модифицированных поверхностных нанослоев

**В. Н. Пименов, А. С. Демин, В. А. Грибков, С. А. Масляев, Е. В. Демина,
И. П. Сасиновская, М. М. Ляховицкий, Г. С. Спрыгин,
А. Н. Тихонов, Г. Г. Бондаренко, А. И. Гайдар**

Исследовано модифицирование структурного состояния и механические свойства наружного и внутреннего поверхностных нанослоев полый металлической трубы из хромомарганцевой аустенитной стали 25Х12Г20В с помощью мощных импульсных излучений, генерируемых в установке Плазменный фокус (ПФ). Показано, что с использованием импульсных потоков ионов дейтерия (с плотностью мощности излучения в плоскости переднего среза трубы $q \approx 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см²) и высокотемпературной дейтериевой плазмы (при $q \approx 10^9$ Вт/см²), генерируемых в установке PF-1000, можно создавать модифицированные поверхностные слои субмикронной и наноразмерной толщины вдоль наружной и внутренней поверхности исследуемой трубы. Установлено заметное упрочнение указанных слоев, рассмотрены механизмы наблюдаемого упрочнения и исследовано образование пузырей наноразмерного масштаба на облученной поверхности. Отмечена перспективность установок ПФ для создания модифицированных слоев субмикронной и наноразмерной толщины.

Ключевые слова: импульсные ионные потоки, высокотемпературная плазма, покрытия, поверхностный нанослой, поверхностное упрочнение.

1. Введение

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием нанотехнологий в различных областях науки и техники, большой интерес приобретает вопрос о создании модифицированных поверхностных слоев и синтезе покрытий наноразмерного масштаба [1, 2]. Один из перспективных путей развития работ в этом направлении лежит в сфере взаимодействия различных видов излучения с веществом [3 – 7]. Особый интерес представляет использование в рассматриваемом аспекте импульсных потоков плазменного, ионного и электронного излучений в установках ПФ [8 – 15], поскольку эта установка генерирует мощные потоки проникающих ионизирующих излучений различной природы с очень короткими длительностями импульсов. Эти факторы позволяют воздействовать на вещество в резко нестационарных условиях, для которых время

импульса облучения лежит в наносекундном диапазоне.

Самостоятельный интерес вызывает вопрос облучения протяженных мишеней в виде полых металлических труб, расположенных вдоль оси рабочей камеры ПФ параллельно падающему потоку энергии. Наблюдаемые в работах [16, 17] закономерности изменения структурных и механических характеристик поверхностных слоев (ПС) шести-гранных стальных труб относятся к слоям, имеющим толщину микронного масштаба ($\sim 1 - 20$ мкм). Между тем, поведение более тонких ПС субмикронного и наноразмерного масштаба в условиях воздействия на них мощных импульсных потоков энергии может иметь отличительные особенности и требует самостоятельного изучения. Например, тонкие нанослои более “чувствительны” к влиянию на них вторичной плазмы, генерируемой воздействием первичных импульсных потоков энергии на облучаемую

Таблица 1

Химический состав стальной трубы

Сталь	Элементы, масс %								
	C	Cr	Mn	Si	W	V	Sc	P	S
25X12Г20В	0,26	12,9	19,3	0,13	2,0	0,15	0,1	0,04	0,008

поверхность. Кроме того, на состояние нанослоев, обращенных к падающему потоку энергии, влияет процесс осаждения элементов, которые испаряются с поверхности функциональных материалов, расположенных в камере ПФ, и могут взаимодействовать между собой и с материалом мишени непосредственно на ее поверхности [11, 16, 17].

Настоящая работа является продолжением исследований, начатых в работах [14 – 17].

Цель работы — изучение особенностей модифицирования структурного состояния и механических свойств наружного и внутреннего поверхностных нанослоев полой металлической трубы из хромомарганцевой аустенитной стали с использованием мощных импульсных потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы (ДП), генерируемых в установке ПФ.

Материал, условия облучения и методы исследования

Материал

Исследуемая полая металлическая труба имела форму шестигранной призмы, которая была изготовлена с использованием процессов выплавки материала и прокатки. Материал трубы представлял собой малоактивируемую хромомарганцевую аустенитную сталь состава 25X12Г20В. Труба имела следующие размеры: длина $L = 30$ см, ширина каждой грани $a = 2,2$ см, толщина стенки $h = 0,1$ см. После прокатки трубу отжигали при 1150°C в течение 10 мин, при этом аустенитное фазовое состояние стали сохранялось. Элементный состав стальной трубы представлен в табл. 1.

Условия облучения

В процессе экспериментов трубу, изготовленную из стали 25X12Г20В, располагали вдоль оси рабочей камеры установки типа Плазменный фокус “PF-1000” [16]. Расстояние между анодом установки и ближайшим к нему срезом трубы составляло $L_1 \approx 14$ см. В качестве рабочего газа в камере ПФ использовали чистый дейтерий при начальном давлении 470 Па. На

трубу-мишень, расположенную в катодной зоне, действовали потоки ДП со средней температурой до 1 кэВ и скоростью распространения $v \approx (2-4) \cdot 10^7$ см/с, а также потоки быстрых ионов дейтерия (ИД) с энергией дейтронов $E_i \geq 100$ кэВ и скоростью движения примерно в 10 раз более высокой, чем скорость плазмы. Длительность движения сгустка ДП длиной $L_p \approx 10$ см через плоскость переднего среза трубы составляла $\tau \leq 1$ мкс. Плотность мощности потока ДП в этой плоскости $q \approx 10^9$ Вт/см², а соответствующая величина для потока ионов — $q \approx 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см². Общее число разрядных импульсов составило $N = 4$.

Методы исследования

Для анализа из исследуемой трубы вырезали образцы размером $1 \times 1 \times 0,15$ см, каждый из которых содержал облученные участки наружной и внутренней поверхностей трубы. Образцы были исследованы методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с применением соответственно микроскопа Neophot и микроанализатора EVO 40, рентгенофазового анализа (установка ДРОН), атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) с использованием спектрометра тлеющего разряда SA-2000 фирмы “LECO”, а также посредством измерения микротвердости. Определение механических характеристик (нанотвердости и модуля Юнга) в слоях субмикронного и наноразмерного масштабов проводили с использованием установки “Nanotest” методом кинетической нанотвердости, в котором измеряемая величина твердости соответствует строго фиксированной глубине погружения индентора.

Результаты и обсуждение

Механические характеристики облученной трубы

В работе [16] было показано, что микротвердость по Виккерсу H_V , измеренная в объеме и вблизи облученных поверхностей шестигранной трубы из стали состава 25X12Г20В, заметно возрастает в зоне

ПС по сравнению с объемными значениями. В частности, в горячей зоне трубы вблизи наружного ПС величина H_V возрастает от значения $H_V \approx 2,2$ ГПа (в объеме на глубине $d \approx 200$ мкм от облученной поверхности) до величины $H_{V_{\max}} \approx 3,1$ ГПа (на глубине $d \approx 50$ мкм от поверхности). Для внутреннего ПС в этой зоне трубы величина H_V возрастает вблизи поверхности до значения $H_{V_{\max}} \approx 2,9$ ГПа. В “холодном” участке рассматриваемой трубы максимальные значения микротвердости в зоне наружного и внутреннего ПС соответственно равны $H_{V_{\max}} \approx 5$ ГПа и $H_{V_{\max}} \approx 4,2$ ГПа [16]. Примерно такой же характер упрочнения ПС наблюдается и для полый стальной трубы состава 10X12Г20В [17]. Указанное возрастание микротвердости может быть связано, главным образом, с двумя факторами — остаточным деформационным упрочнением ПС после прокатки и отжига трубы и модифицированием ПС в процессе импульсной радиационно-термической (ИРТ) обработки материала потоками ионов дейтерия и ДП, вследствие частичного $\gamma \rightarrow \alpha$ фазового превращения.

Для анализа механизмов ИРТ упрочнения ПС субмикронной и наноразмерной толщины в данной работе был применен метод измерения кинетической нанотвердости H и модуля упругости Юнга вблизи наружной и внутренней поверхностей исследуемой облученной трубы. Результаты измерений, полученные для горячей зоны трубы, расположенной наиболее близко к источнику излучения, и ее холодной части (удаленной от этого источника) представлены на рис. 1. Из рисунков видно, что обе указанные характеристики в поверхностном слое толщиной $d \leq 1,5$ мкм заметно возрастают по мере приближения к облученной поверхности и достигают своих наибольших значений в тонких нанослоях, непосредственно у поверхности. Так, в горячей зоне трубы для наружного ПС $H_{\max} \approx 6$ ГПа, а для внутреннего ПС $H_{\max} \approx 5$ ГПа; в холодной зоне эти параметры соответственно равны $H_{\max} \approx 8,7$ ГПа и $H_{\max} \approx 10,5$ ГПа. Наиболее резкое изменение значений H наблюдается, как видно из рис. 1, в очень тонком поверхностном нанослое, толщина которого менее $100 - 200$ нм. Кривая изменения модуля Юнга на глубине $d \approx 1,5$ мкм изменяется в меньших пределах и является несколько более гладкой. Сравнивая значения микротвердости H_V , найденные в работе [16], и кинетической нанотвердости H , можно заключить, что максимальные значения H превышают соответствующие значения H_V примерно в $1,7 - 2,5$ раза. По сравнению с величиной микротвердости трубы H_V в исходном состоянии отношение (H/H_V) возрастает еще больше. Это означает, что в реализованном режиме облучения ИРТ обработка мате-

риала шестигранной трубы дополнительно упрочняет ее наружный и внутренний ПС по сравнению с его механическим упрочнением на стадии процесса прокатки и отжига, причем наибольшая степень упрочнения достигается в ПС наноразмерной толщины.

Структурно-фазовое состояние поверхностных слоев

Рентгенофазовый анализ показал, что в исследуемых нанослоях имеет место частичное $\gamma \rightarrow \alpha$ фазовое превращение с образованием мартенситной структуры, которое индуцировано воздействием импульсных потоков ИД и ДП на материал. Типичные рентгеновские дифрактограммы до и после облучения трубы представлены на рис. 2. Видно, что если до облучения на дифрактограммах присутствуют только линии, характерные для γ -фазы (аустенита), то после облучения появились линии, соответствующие α -фазе. Оценки показали, что содержание α -фазы в наружном ПС облученной трубы было в пределах $\sim 1,5 - 3,0$ об. %, а во внутреннем ПС составляло $5,0 - 9,5$ %. Механизм наблюдаемого частичного фазового превращения связан с испарением с облучаемой поверхности в процессе импульсного воздействия энергии [16] марганца, который является стабилизатором γ -фазы. При этом быстрые ионы дейтерия с энергией $E \geq 100$ кэВ и проективным пробегом в стали в несколько сотен нанометров способствовали $\gamma \rightarrow \alpha$ фазовому превращению в более глубоких слоях. “Низкоэнергетические” ионы ДП с энергией $E \approx 1$ кэВ и глубиной пробега в несколько нанометров вызывали эрозию (потерю массы при испарении) в тонких поверхностных нанослоях.

Обращает также на себя внимание тот факт, что после облучения исследуемой стальной трубы наблюдается заметное уменьшение рентгеновского пика $(111)_\gamma$ и возрастание интенсивности линии $(200)_\gamma$ (рис. 2). Этот результат указывает на образование текстуры кристаллизации в направлении градиента температур, связанной с переориентацией зерен γ -фазы из исходного состояния, определяемого горячей прокаткой материала с последующим отжигом, в новое положение, задаваемое условиями затвердевания расплавленного ПС после облучения. Примерно такая же картина наблюдалась в работе [18] после облучения ДП исследуемой нами стали в установке ПФ-60 при ином расположении образцов-мишеней — не аксиально, а нормально к падающему потоку энергии. Но, в отличие от нашего случая, в работе [18] в облученных образцах уменьшение рент-

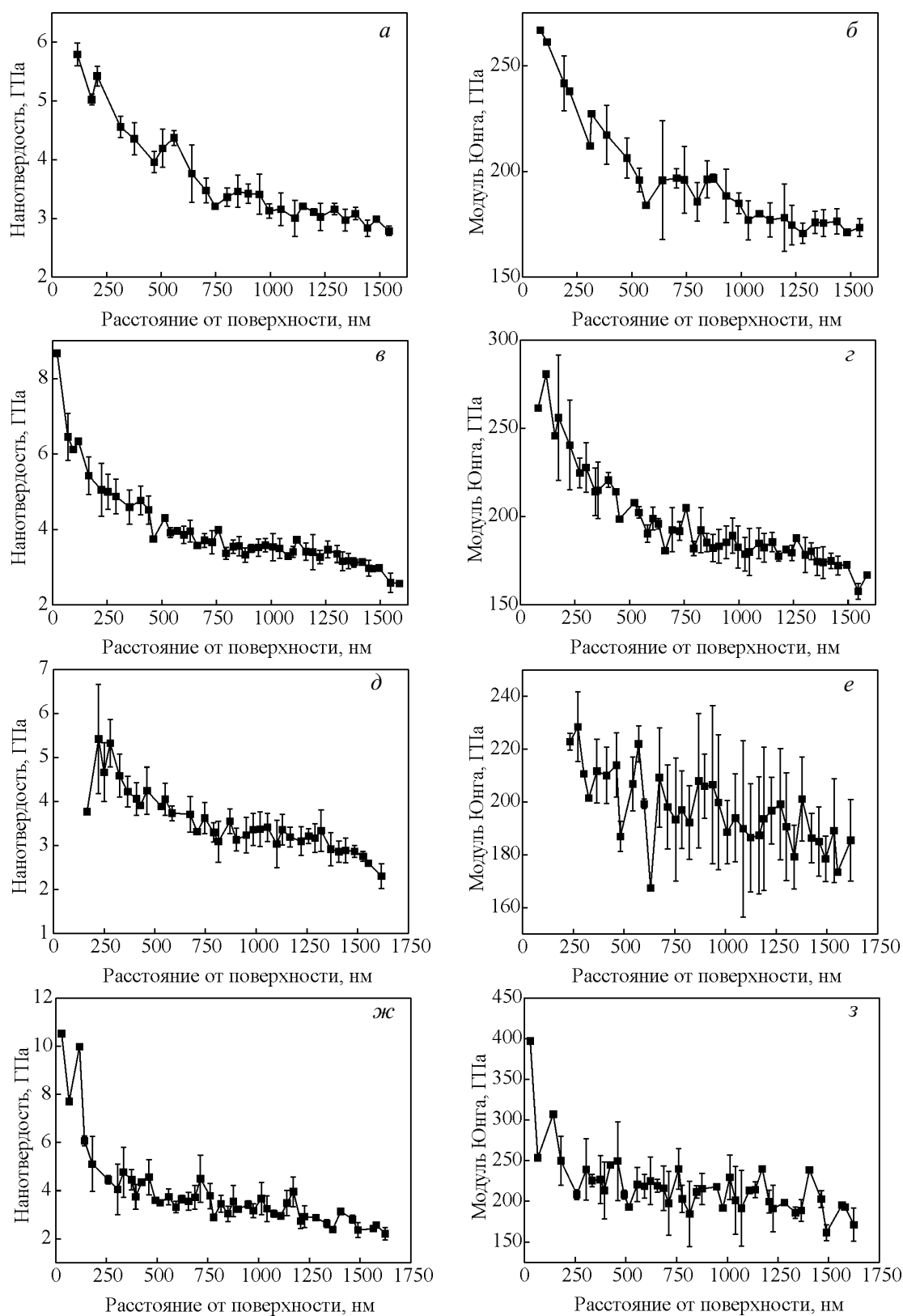


Рис. 1. Изменение нанотвердости (а, в, д, ж) и модуля Юнга (б, г, е, з) с глубиной вблизи наружной (а – г) и внутренней (д – з) поверхностей трубы 25X12Г20В после четырех импульсных разрядов энергии в установке ПФ: а, б, д, е – горячая зона, в, г, ж, з – холодная зона

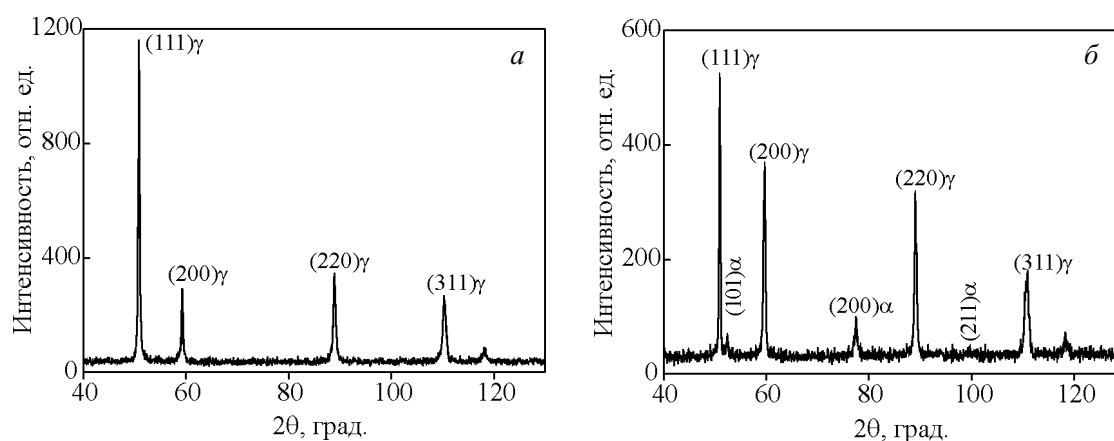


Рис. 2. Дифракционные линии для трубы 25X12Г20В: *а* — исходное состояние, *б* — облученная внутренняя поверхность (“горячий” торец трубы).

геновского пика $(111)_\gamma$ сопровождалось возрастанием линии $(110)_\gamma$, то есть текстура кристаллизации γ -фазы возникала не в направлении (200), а в направлении (110). Этот факт подчеркивает “чувствительность” процесса высокоскоростной кристаллизации расплава на облученной поверхности как к исходному структурному состоянию материала, так и к условиям охлаждения жидкой фазы в сопоставляемых случаях. Существенным обстоятельством является тот факт, что фазовые составляющие стали (α - и γ -фаза) после облучения как наружного, так и внутреннего ПС трубы, находятся в дисперсном состоянии. Анализ показал, что характерный размер фазовых включений был порядка 100 нм, причем концентрация дисперсных включений α -фазы и во внутреннем, и в наружном ПС трубы снижается с увеличением расстояния от источника излучения вдоль трубы. Монотонный характер кривых на рис. 1 отражает дисперсный характер распределения включений α -фазы в ПС с возрастанием их концентрации непосредственно у облученной поверхности как с наружной стороны трубы, так и во внутренней полости.

Механизмы упрочнения поверхностных слоев

Судя по характеру кривых на рис. 1, указывающих на резкое возрастание значений нанотвердости по

мере приближения к облученной поверхности, можно полагать, что этот факт связан с увеличением концентрации дисперсных выделений мартенситной α -фазы в этой области ПС. Так как мартенсит обладает более высокой твердостью и имеет больший удельный объем по сравнению с аустенитом [19, 20], его образование в ПС приводило к возникновению внутренних напряжений в кристаллической решетке и дополнительно способствовало деформационному упрочнению материала.

Еще одним фактором радиационно-термического упрочнения материала, действовавшим преимущественно во внутренней полости трубы, был процесс имплантации ионов дейтерия в облучаемый ПС. Об этом говорят результаты измерения параметра решетки a γ -фазы во внутреннем и наружном ПС трубы, приведенные в табл. 2. Из таблицы видно, что параметр a для внутреннего ПС больше, чем для наружного и, в отличие от последнего, возрастает вдоль трубы по мере перехода из ее горячей зоны в холодную часть. Увеличение параметра a кристаллической решетки происходит, как правило, при имплантации в нее ионов рабочего газа [21] — в нашем случае дейтерия. Результаты табл. 2 указывают на то, что рассматриваемая имплантация в облученные ПС наиболее интенсивно происходила в центральной и холодной зонах внутрен-

Таблица 2

Параметр решетки γ -фазы в поверхностных слоях трубы 25X12Г20В после облучения дейтериевой плазмой

Номер образца	Зона облучения трубы	Параметр решетки, a , Å		Объем элементарной ячейки, V , Å ³	
		наружный ПС	внутренний ПС	наружный ПС	внутренний ПС
1	Горячий участок	3,6053	3,6063	46,86	46,90
9	Центральная часть	3,6042	3,6075	46,82	46,95
11	Переходная зона	3,6037	3,6104	46,80	47,06
15	Центральн./Холодн. Холодный участок	3,6030	3,6113	46,77	47,09

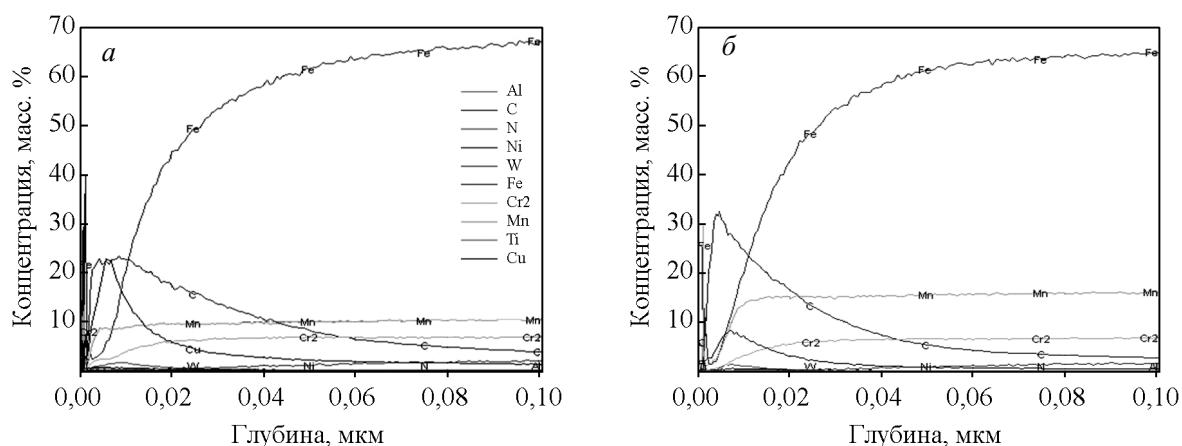


Рис. 3. Распределение элементов по глубине поверхностных слоев вблизи наружной (а) и внутренней (б) поверхностей «холодной» зоны трубы 25X12Г20В после 4 импульсов воздействия потоков ионов дейтерия и ДП (АЭС).

ней полости трубы по сравнению с ее наружной частью.

Данный факт связан с тем, что в эту полость попадала подавляющая часть быстрых ионов, основной поток которых при импульсном разряде в установке ПФ распространяется от источника излучения в сторону мишени в пределах достаточно узкого телесного угла $\alpha \leq 10^\circ$ [22]. В работах [14, 15] показано, что двигаясь внутри трубы с более высокой скоростью по сравнению со скоростью сгустка плазмы, поток быстрых ионов на стадии опережения им фронта потока плазмы (примерно в зоне перехода от центральной части трубы к холодной) «рассыпается», и дейтроны, «бомбардируя» ПС, интенсивно имплантируются в него. С этим фактом и связано наблюдаемое для внутреннего ПС увеличение параметра решетки a в образцах 9, 11 и 15 (табл. 2). Имплантированные в ПС дейтроны с энергией E в несколько сотен кэВ и более вносят искажения в кристаллическую решетку, что обычно приводит к возникновению механических напряжений и способствует ее упрочнению.

Дополнительным механизмом упрочнения нанослоев в рассматриваемых условиях облучения, наблюдаемым преимущественно в холодном участке трубы, является процесс осаждения на облучаемые поверхности трубы в этой зоне углерода, хрома и меди. Хром и углерод входили в состав стали X18H9T, из которой были изготовлены катодные трубки, равномерно расположенные вокруг цилиндрического анода ПФ, параллельно ему и трубе-мишени [16]. Геометрия экспериментов в установке PF-1000 была такая, что потоки плазмы, распространяющейся в объеме рабочей камеры, воздействовали на поверхность катодных трубок и способствовали

частичному испарению элементов материала катода и их последующему осаждению на различные участки в горячей и холодной зонах облучаемой трубы. Углерод, кроме того, мог входить в состав рабочего газа в качестве элемента примеси и после каждого импульсного разряда осаждался на поверхность трубы в виде «нанопленки». Так как анод установки был сделан из высокочистой меди, то она интенсивно испарялась импульсными потоками быстрых электронов ($E_e \approx 100$ кэВ) и затем осаждалась на поверхность трубы [16]. Распределение элементов по глубине наружного и внутреннего ПС в холодной части облученной трубы, определенное методом АЭС, представлено на рис. 3. Из рис. 3 видно, что в зоне наружной поверхности происходит резкое возрастание углерода, хрома, и меди, в зоне внутренней поверхности — углерода и меди. Наблюдаемое изменение состава поверхностных нанослоев трубы в холодной зоне, судя по приведенным результатам, оказывало влияние на упрочнение материала трубы в рассматриваемой области. Этому факту способствовала также возможность образования в облученных нанослоях карбидных соединений углерода с элементами, входящими в состав стали или осажденными на её поверхность. В условиях быстротекущих процессов (плавления и испарения ПС, осаждения элементов, кристаллизации) карбидные соединения находились в дисперсном состоянии у самой поверхности, где зафиксированы максимальные значения нанотвердости и модуля Юнга.

Образование пузырей на облученной поверхности

Ранее, в работе [16], было показано, что на наружной поверхности хвостовой части исследуемой

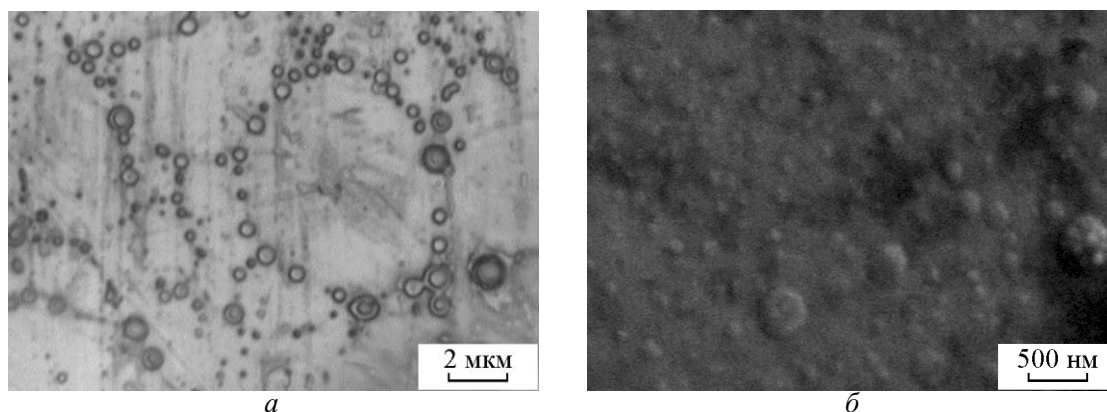


Рис. 4. Микрофотография участков поверхности образца стальной трубы 25X12Г20В после 4 импульсных воздействий потоков ионов дейтерия и ДП: *а* — наружная поверхность в холодной зоне [16], *б* — внутренняя поверхность в горячей зоне. Видно наличие пузырей микронного (*а*) и наноразмерного (*б*) масштаба.

трубы (в холодной зоне) после 4-х импульсных воздействий ДП наблюдали пузыри с характерным размером порядка 1 мкм (рис. 4*а*). В горячей зоне трубы облученная поверхность, как с внешней, так и с внутренней стороны, содержала достаточно крупные (~ 100 мкм) структурные дефекты типа капель, наплывов и гребней, концентрация которых была выше на внутренней поверхности.

В данной работе детальное исследование нанослоев в горячей зоне трубы методом РЭМ позволило нам при большом увеличении выявить наличие на облученной поверхности множество мелких капель сфероидального вида размером ~100 нм, напоминающих пузыри типа блистеров [23] (рис. 4*б*). При этом на внутренней поверхности трубы количество указанных структурных дефектов было заметно больше, чем на внешней поверхности. Для выяснения природы наблюдаемых дефектов методом АЭС был

выполнен элементный анализ в облученных ПС горячего торца трубы. Анализ проводили как в слоях толщиной в несколько микрометров, так и в субмикронных нанослоях. Результаты распределения анализируемых элементов по глубине исследуемых слоев представлены на рис. 5. Видно, что после облучения по мере приближения из слоя глубиной ~ 2 мкм к поверхности происходит снижение концентрации Fe и Mn и возрастает содержание Cr и C. Непосредственно же у поверхности, в нанослоях толщиной менее 100 – 200 нм, наблюдается резкое возрастание концентрации C, снижение концентрации Cr, а также заметное увеличение содержания меди, дейтерия и кислорода. Наблюдаемое снижение концентрации Mn и Fe обусловлено испарением этих элементов с поверхности при воздействии на нее потоков ионов дейтерия и ДП. Соответствующее же возрастание Cr и C от глубины ~ 2 мкм (рис. 5*б*) может

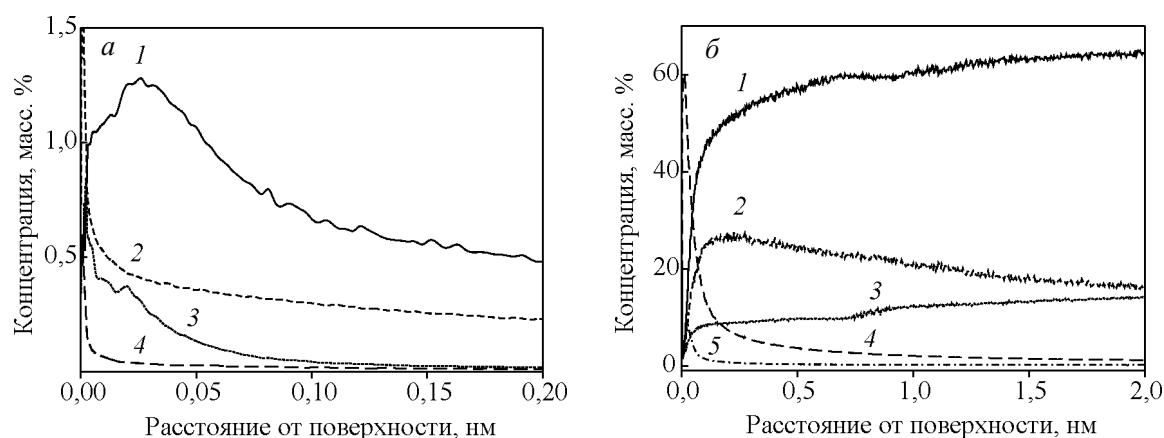


Рис. 5. Распределение элементов по глубине поверхностного слоя вблизи «горячего» торца трубы: *а*) 1 — дейтерий на внутренней поверхности, 2 — дейтерий на внешней поверхности, 3 — кислород на внутренней поверхности, 4 — кислород на внешней поверхности; *б*) 1 — железо, 2 — хром, 3 — марганец, 4 — углерод, 5 — медь.

быть связано с процессом восходящей диффузии этих элементов к поверхности в условиях градиента термических напряжений, создаваемого градиентом температур при импульсном воздействии энергии [1, 24]. По-видимому, этот же процесс приводит к происходящему в поверхностном нанослое увеличению концентрации кислорода — элемента примеси в исследуемой стали. Присутствие на облученных поверхностях Си и высокая концентрация углерода связано с осаждением этих элементов после их испарения с поверхности функциональных материалов ПФ — соответственно с медного анода и с катодных трубок (см. раздел “Механизмы упрочнения”).

Обращает на себя особое внимание заметно более высокая концентрация дейтерия в области внутренней поверхности трубы по сравнению с его содержанием в наружном нанослое (рис. 5а). Наличие в рассматриваемых нанослоях дейтерия подтверждает тот факт, что после импульсной имплантации в объем материала он не удалялся полностью из него в процессе испарения или диффузионным путем, а оставался в кристаллической решетке.

При этом ионы дейтерия могли частично растворяться в решетке, оставаясь в свободном состоянии, либо захватываться “центрами захвата” (ловушками). В первом случае атомы дейтерия быстро покидали ПС посредством диффузии через облучаемую поверхность в пространство рабочей камеры или, диффундируя в более глубокие слои материала мишени [25]. Захват же атомов дейтерия ловушками вероятнее всего сопровождался образованием вакансионных комплексов (энергия связи водорода с вакансией в Fe $\sim 0,5$ эВ, с кластером вакансий $\sim 0,7 - 0,8$ эВ) или проходил посредством взаимодействия дейтерия с дефектами решетки типа атомов примесей, пор и др. [26]. Следует заметить, что химическое взаимодействие имплантированного дейтерия с междоузельными примесными атомами было маловероятно из-за малой величины энергии связи атома дейтерия с этими элементами. Например, энергия связи атома водорода с междоузельными атомами углерода и кислорода лежит в пределах $0,05 - 0,08$ эВ [26]. По-видимому, соответствующая энергия связи для атома дейтерия — величина того же порядка. Последующее импульсное воздействие потоков энергии на материал трубы вновь приводило к взрывному плавлению, частичному испарению и кипению ПС жидкой фазы. Присутствие в материале имплантированного ранее дейтерия, а также наличие примесного кислорода и углерода, способствовали образованию в объеме расплава газовых включений

— пузырей [27]. Часть из них удалялась из расплава через свободную поверхность, часть оставалась преимущественно в нанослое, а также в более глубоких слоях облучаемой трубы.

С учетом сказанного и результатов АЭС (рис. 5а), можно заключить, что микрокапли, наблюдаемые на облученной поверхности трубы (рис. 4б), представляют собой пузыри, которые, вероятнее всего, содержат в себе газообразный дейтерий с возможной примесью атомов С и О. При воздействии импульсного ионно-плазменного потока с энергией частиц, много большей энергии связи атомов дейтерия с комплексом вакансий, имплантированные ранее в материал ионы дейтерия, “испарялись” в микропоры, которые, коагулируя в жидкой фазе, “всплывали” в виде пузырей вблизи облученной поверхности. Высокая концентрация дейтерия на внутренней поверхности трубы определяется имплантацией в нее не только “низкоэнергетических” (с энергией ~ 1 кэВ) ионов плазмы, но и быстрых (с энергией в сто и более кэВ) ионов дейтерия. Это связано с тем, что основной поток быстрых ионов рабочего газа в установке ПФ распространяется от источника излучения внутри узкого телесного угла $\alpha < 10^\circ$, и при реализованной геометрии эксперимента доминирующая его часть попадает во внутреннюю полость трубы. Данное обстоятельство способствовало образованию большого количества пузырей в нанослое именно на внутренней поверхности трубы.

Выводы

1. Показано, что с использованием мощных импульсных потоков ионов дейтерия и высокотемпературной дейтериевой плазмы, генерируемых в установке Плазменный фокус PF-1000, можно создавать модифицированные ПС субмикронной и наноразмерной толщины в материале полой шестигранной трубы из малоактивируемой хромомарганцевой аустенитной стали 25Х12Г20В при ее расположении вдоль оси рабочей камеры ПФ в процессе облучения. При этом плотность мощности излучения на переднем “горячем” срезе трубы для потока ионов дейтерия составляет $q \approx 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см², а для дейтериевой плазмы — $q \approx 10^9$ Вт/см².

2. Установлено, что модифицирование наружного и внутреннего поверхностных нанослоев облучаемой трубы осуществляется механизмами, индуцированными импульсным радиационно-термическим воздействием: частичным структурно-фазовым $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением с образованием мартенситной структуры в сочетании с процессами

имплантации в материал мишени ионов дейтерия и осаждением на ее поверхность легирующих элементов.

3. Обнаружено существенное изменение механических характеристик (нанотвердости и модуля Юнга) модифицированных наружного и внутреннего ПС шестигранной трубы, связанное с их упрочнением: обе характеристики после воздействия потоков энергии на материал возрастают на облученной поверхности примерно в 2 – 2,5 раза по сравнению с соответствующими значениями на глубине ~ 1000 – 1500 нм.

4. Показано, что на облученной поверхности исследуемой трубы, преимущественно во внутренней полости ее горячей части, наблюдаются пузыри с характерным размером ~ 100 нм, наполненные дейтерием с возможной примесью атомов углерода и кислорода. Отмеченный факт связан, главным образом, с испарением имплантированного в материал дейтерия, а также углерода и кислорода примеси в микропоры с их последующей коагуляцией в пузыри при многократном импульсном воздействии ионных и плазменных потоков на стальную трубу.

5. Полученные результаты показывают, что с использованием комбинированного воздействия потоков высокотемпературной плазмы и ионных пучков на материал мишени, расположенной в катодной зоне ПФ, в сочетании с воздействием электронов на материал анода можно создавать в облучаемой мишени модифицированные слои субмикронной и наноразмерной толщины с измененным структурно-фазовым состоянием и улучшенными физико-механическими свойствами. Это указывает на перспективность объединения различных видов излучений, воздействующих на материал, в единый технологический процесс импульсной обработки поверхности с целью получения новых свойств.

Авторы благодарны д-рам М. Шольцу и Л. Карпинскому, а также всей команде экспериментаторов установки PF-1000, за возможность проведения данных экспериментов в Институте физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава, Польша.

Настоящая работа поддержана Международным Агентством по Атомной Энергии (гранты IAEA CRP № 16954, 16955, 16956, 16960, 17167) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант 12-08-12047).

Литература

1. 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.
2. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр “Академия”, 2005, 192 с.
3. Симакин А.В., Воронов В.В., Шафеев Г.А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях. Труды института общей физики им. А.М. Прохорова, 2004, т. 60, с. 83 – 107.
4. Бармина Е.В., Стратакис Э., Фотакис К., Шафеев Г.А. Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты. Квантовая электроника, 2010, т. 40, № 11, с. 1012 – 1020.
5. 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, № 5, с. 97 – 104.
6. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989, 328 с.
7. Пинчук Т.Н., Диденко Т.П., Дмитренко О.П., Кулиш Н.П. Радиационная модификация физико-механических свойств изотактического полипропилена с многостенными углеродными нанотрубками. ВАНТ, 2009, № 4 – 2, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (94), с. 275 – 278.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Pimenov V.N. Influence of powerful pulse beams produced by dense plasma focus devices upon condensed materials for modification on their properties and for development of new technologies of pulse treatment of materials, IAEA-TECDOC-1699 Dense Magnetized Plasmas, Report of a coordinated research project 2001 – 2006, IAEA, Vienna, 2013, p. 71 – 95.
12. Gribkov V.N., Jednorog S., Repetitive plasma focus as a source of ionizing radiation and plasma streams for application in material technology, biology and medicine. IAEA-TECDOC-1699 Dense Magnetized Plasmas. Report of a coordinated research project 2001 – 2006, IAEA, Vienna, 2013, p. 7 – 33.
13. Demina E.V., Gribkov V.A., Dubrovsky A.V., Pimenov V.N., Maslyayev S.A., Prusakova M.D., Sasinovskaya I.P.,

- Scholz M., Paduch M., Tartari A. Creation of a dense plasma focus device and its application in radiation material sciences for the goals of the mainstream fusion researches. IAEA – TECDOC – 1708 Integrated Approach to Dense Magnetized Plasmas Applications in Nuclear Fusion Technology. Report of a coordinated research project 2007 – 2011. International Atomic Energy Agency, Vienna 2013, pp. 27 – 53.
14. 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, с. 15 – 22.
 15. 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.
 16. 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
 17. 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, 1 – 8.
 18. Ivanov L.I., Pimenov V.N., Maslyayev S.A., Dyomina E.V. et al. Influence of dense deuterium plasma pulses on materials in Plasma Focus device. Nukleonika, 2000, v. 45, no. 3, p. 203 – 207.
 19. Лившиц Б.Г. Металлография. М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963, 422 с.
 20. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1980, 493 с.
 21. Демина Е.В., Пименов В.Н., Масляев С.А., Грибков В.А., Дубровский А.В. и др. Структурные изменения и образование нитридных фаз в поверхностном слое сплавов на основе железа при импульсном воздействии ионов азота и азотной плазмы. Физика и химия обработки материалов, 2010, № 3, с. 51 – 57.
 22. Грибков В.А., Демин А.С., Демина Е.В., Дубровский А.В., Масляев С.А., Пименов В.Н., Прусакова М.Д., Сасиновская И.П., Шольц М., Карпинский Л. Воздействие экстремальных потоков энергии на хромомарганцевую аустенитную сталь X12Г14Н4ЮМ, модифицированную скандием. Физика и химия обработки материалов, 2012, № 4, с. 5 – 12.
 23. Bondarenko G.G. Irradiation effects in surface layers of aluminium alloys and austenitic steels. Materials Science Forum, 1992, v. 97 – 99, p. 695 – 718.
 24. Андрющенко В.А., Дзевин Е.Н., Мазанко В.Ф., Свечников В.Л. Восходящая диффузия в приповерхностных слоях сплавов Fe – Al – C в процессе лазерного воздействия. Металлофизика и новейшие технологии, 1999, т. 21, № 9, с. 71 – 77.
 25. Иванов Л.И., Угасте Ю.Э., Пименов В.Н., Грибков В.А., Меззетти Ф. Массоперенос водорода из объема сплавов на основе железа в окружающую среду. Перспективные материалы, 2000, № 2, с. 18 – 26.
 26. Неклюдов И.М., Толстолуцкая Г.Д. Гелий и водород в конструкционных материалах. ВАНТ, 2003, № 3, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (83), с. 3 – 14.
 27. Пименов В.Н., Грибков В.А., Иванов Л.И., Шольц М., Угасте Ю.Э., Демина Е.В., Масляев С.А., Дубровский А.В., Миклашевский Р., Колман Б., Коденцов А.А. Новые возможности применения установок Плазменный фокус для модифицирования поверхностных слоев материалов. Перспективные материалы, 2003, № 1, с. 13 – 23.

References

1. Ivanov L.I., Pimenov V.N., Gribkov V.A. Vzaimodeistvie moshnyh impulsnyh potokov energii s materialami. [Interaction of power pulsed energy streams with materials.] *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2009, no. 1, pp. 23 – 37.
2. Andrievskiy R.A., Ragulya A.V. *Nanosrukturnye materialy* [Nanostructure materials]. Moscow, Izdatekskiy tsentr Akademiy — Publishing center Academy, 2005, 192 p.
3. Simakin A.V., Voronov V.V., Shafeev G.A. Obrazovaniye nanochastits pri lazernoy ablyatsii tvyordyh tel v zhidkostyah [Formation of nano-particles by laser ablation of solids in liquid medium]. *Trudy instituta obschey fiziki im. A.M.Prokhorova* [Proceedings of A.M.Prokhorov General Physics Institute RAS], 2004, vol. 60, pp. 83 – 107.
4. Barmina E.V., Stratakis E., Fotakis K., Shafeev G.A. Generatsiya nanostruktur pri laserной ablyatsii metallov v zhidkostyah: novye rezultaty [Generation of nanostructures by laser ablation of metals in liquid medium: new results]. *Kvantovaya elektronika — Quantum Electronics*, 2010, vol. 40, no. 11, pp.1012 – 1020.
5. Naydich Yu.V., Gab I.I., Kostyuk B.D., Stetsyuk T.V., Kurkova D.I., Dukarov S.V. *Nanoplyonki metallov v protsessah soedineniya (payki) keramicheskikh materialov* [Metal nano-films in processes of joint (soldering) of ceramics]. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2007, no.5, pp. 97 – 104.
6. Danilin B.S. *Primenenie nizkotemperaturnoy plasmy dlya naneseniya tonkih plyonok* [The application of low-temperature plasma for deposition of thin films], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 328 p.
7. Pinchuk T.N., Didenko T.P., Dmitrienko O.P., Kulish N.P. Radiatsionnaya modifikatsiya fiziko-mekhanicheskikh svoystv izotakticheskogo polipropilena s mnogostennymi uglerodnymi trubkami [Radiation modification of physical and mechanical properties of isotactic polypropylene with multi-walled carbon nanotubes]. *Voprosy atomnoi*

- nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie — Problems of atomic science and technology. Ser. Physics of radiation effect and radiation material science*, 2009, no. 4-2, (94), pp. 275 – 278.
8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Pimenov V.N. Influence of powerful pulse beams produced by dense plasma focus devices upon condensed materials for modification on their properties and for development of new technologies of pulse treatment of materials, IAEA-TECDOC-1699 Dense Magnetized Plasmas, Report of a coordinated research project 2001 – 2006, IAEA, Vienna, 2013, pp. 71 – 95.
 12. Gribov V.N., Jednorog S. Repetitive plasma focus as a source of ionizing radiation and plasma streams for application in material technology, biology and medicine. IAEA-TECDOC-1699 Dense Magnetized Plasmas. Report of a coordinated research project 2001 – 2006, IAEA, Vienna, 2013, pp. 7 – 33.
 13. Demina E.V., Gribov V.A., Dubrovsky A.V., Pimenov V.N., Maslyayev S.A., Prusakova M.D., Sasinovskaya I.P., Scholz M., Paduch M., Tartari A. Creation of a dense plasma focus device and its application in radiation material sciences for the goals of the mainstream fusion researches. IAEA – TECDOC – 1708 Integrated Approach to Dense Magnetized Plasmas Applications in Nuclear Fusion Technology. Report of a coordinated research project 2007 – 2011. International Atomic Energy Agency, Vienna 2013, pp. 27 – 53.
 14. Maslyayev S.A., Pimenov V.N., Gribov V.A., Demin A.S. Povrezhdaemost hromomargantsevykh staley impulsnymi potokami ionov i plotnoy plazmy pri ih razdelnom vozdeystvii na material v ustanovke Plazmenniy fokus [Damage of Chromium-manganese steels under separate effects of pulsed ion beams and dense plasma in Plasma Focus device], *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2011, no. 1, pp. 15 – 22.
 15. Gribov V.A., Demin A.S., Dyomina E.V., Dubrovsky A.V., Karpinsky L., Maslyayev S.A., Paduch M., Pimenov V.N., Scholz M. Fizicheskiye protsessy protekayuschiye pri vzaimodeystvii impulsnykh ionnykh i plazmennyykh potokov s poverhnostyu misheni v forme plastiny i truby v rabochey kamere ustanovki Plazmenniy fokus [Physical processes occurring as result of interaction of pulsed ion and plasma flows with the surface of target in the form of plates and tubes in the chamber of Plasma Focus device]. *Prikladnaya fizika — Applied physics*, 2011, no. 3, pp. 43 – 51.
 16. Pimenov V.N., Dyomina E.V., Maslyayev S.A., Ivanov L.I. et al. Vzaimodeystviye impulsnykh potokov ionov deyteriya i plotnoy plazmy s materialom truby iz maloaktiviruemy austerinitnoy stali v ustanovke plazmenniy fokus [Interaction of the pulsed flows of deuterium ions and dense plasma with the tube material of low activation austenitic steel in Plasma focus device]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2007, no. 2, pp. 48 – 56.
 17. Dyomina E.V., Ivanov L.I., Maslyayev S.A., Pimenov V.N., Sasinovskaya I.P., Gribov V.A., Dubrovsky A.V. Modifitsirovaniye poverhnostnykh sloyn stalnykh trub impulsnymi potokami ionov I vysokotemperaturnoy plazmy [Modification of the surface layers of steel tubes by pulsed ion beams and high-temperature plasma]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2008, no. 5, pp. 1 – 8.
 18. Ivanov L.I., Pimenov V.N., Maslyayev S.A., Dyomina E.V. et al. Influence of dense deuterium plasma pulses on materials in Plasma Focus device. *Nukleonika*, 2000, vol. 45, no. 3, pp. 203 – 207.
 19. Livshits B.G. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, The State Scientific Technology publishing house for ferrous and non-ferrous metallurgy, 1963, 422 p.
 20. Lahtin Yu.M., Leontyeva V.P. *Materialovedenie* [Material science], Moscow, Mashinostroenie — Engineering Publ., 1980, 493 p.
 21. Dyomina E.V., Pimenov V.N., Maslyayev S.A., Gribov V.A., Dubrovsky A.V. et al. Strukturnyye izmeneniya i obrazovaniye nitridnykh faz v poverhnostnom sloye splavov na osnove zheleza pri impulsnom vozdeystvii ionov azota i azotnoy plazmy [Structural changes and the formation of nitride phases in the surface layer of iron-based alloys under pulsed action of nitrogen ions and nitrogen plasma]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2010, no. 3, pp. 51 – 57.
 22. Gribov V.A., Demin A.S., Dyomina E.V., Dubrovsky A.V., Maslyayev S.A., Pimenov V.N., Prusakova M.D., Sasinovskaya I.P., Scholz M., Karpinsky L. Vozyeystviye ekstremalnykh potokov energii na hromomargantsevyuyu austerinitnyuyu stal H12G14N4YUM modifitsirovannuyu skandiyem [The influence of extreme energy flows on chromium-manganese austenitic steel Cr12-Mn14-Ni4 Al1-Mo1 modified by scandium]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2012, no. 4, pp. 5 – 12.
 23. Bondarenko G.G. Irradiation effects in surface layers of aluminium alloys and austenitic steels. *Materials Science Forum*, 1992, vol. 97 – 99, pp. 695 – 718.
 24. Andryuschenko V.A., Dzevin E.N., Mazanko V.F., Svechnikov V.L. Voskhodyaschaya diffuziya v pripoverhnostnykh sloyn splavov Fe – Al – C v protsesse lazernogo vozdeystviya [Ascending diffusion in the surface layers of Fe – Al – C alloys under laser irradiation]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii — Metal physics and advanced technologies*, 1999, vol. 21, no. 9, pp. 71 – 77.

25. Ivanov L.I., Ugaste Yu.E., Pimenov V.N., Gribkov V.A., Mezzetti F. Massoperenos vodoroda iz obyoma splavov na osnove zheleza v okruzhayushchuyu sredu [The mass transfer of hydrogen from the volume of iron-based alloys to the environment]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2000, no. 2, pp. 18 – 26.
26. Neklyudov I.M., Tolstolutsкая G.D. Geliy i vodorod v konstruktsionnykh materialakh [Helium and hydrogen in structural materials]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie — Problems of atomic science and technology. Ser. Physics of radiation effect and radiation material science*, 2003, no. 3, (83), pp. 3 – 14.
27. Pimenov V.N., Gribkov V.A., Ivanov L.I., Scholz M., Ugaste Yu.E., Dyomina E.V., Maslyayev S.A., Dubrovsky A.V., Miklashevsky R., Kolman B., Kodentsov A.A. Novye vozmozhnosti primeneniya ustanovok Plazmenniy fokus dlya modifitsirovaniya poverhnostnykh sloyov materialov [New applications of Plasma focus devices for modifying the surface layers of materials]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2003, no. 1, pp. 13 – 23.

Статья поступила в редакцию 26.05.2014 г.

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.

Демин Александр Сергеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, младший научный сотрудник, специалист в области материаловедения. E-mail: casha@bk.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@rambler.ru.

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: maslyayev@mail.ru.

Демина Елена Викторовна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: elenadyom@mail.ru.

Ляховицкий Марк Матвеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области теплофизики и материаловедения. E-mail: markl@yandex.ru.

Сасиновская Ирина Порфирьевна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, научный сотрудник, специалист в области материаловедения и металлографии. E-mail: porfirievna@mail.ru.

Спрыгин Георгий Сергеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, научный сотрудник, специалист в области спектрального анализа. E-mail: engae@rambler.ru

Тихонов Александр Николаевич — Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”, доктор физико-математических наук, профессор, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: atikhonov@hse.ru.

Бондаренко Геннадий Германович — Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”, доктор физико-математических наук, профессор, специалист в области физики конденсированного состояния, радиационной физики твердого тела. E-mail: gbondarenko@hse.ru.

Гайдар Анна Ивановна — Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий”, старший научный сотрудник, специалист в области структурного анализа материалов. E-mail: niipmt@mail.ru.

Using of power energy impact to create modified surface nanolayers

**V. N. Pimenov, A. S. Demin, V. A. Gribkov, S. A. Maslyaev, E. V. Dyomina,
I. P. Sasinovskaya, M. M. Lyakhovitsky, G. S. Sprygin, A. N. Tikhonov,
G. G. Bondarenko, A. I. Gaydar**

Modification of the structure and mechanical properties of outside and inner nanometer scale surface layers of the steel tube (25Cr12Mn20W) under powerful pulsed irradiation in Plasma Focus (PF) device has been investigated. It have been shown that using pulsed beams of deuterium ions (with power density at the frontal end of the tube $q \approx 10^{10} - 10^{11}$ W/cm²) and high temperature deuterium plasma (with $q \approx 10^9$ W/cm²) in the PF-1000 facility (IPPLM, Warsaw, Poland) it is possible to create modified surface layers of submicron and nanometer scale thickness on the inner and outside surface of the tube. Significant hardening of the layers has been established and mechanisms for observed hardening were discussed. The formation of nanometer scale blisters on irradiated surface has been investigated. Prospects of PF applications for production of modified layers of submicron and nanometer scale thickness were discussed.

Key words: pulsed ion beam, high temperature plasma, coating, surface nano-layer, surface hardening.

Pimenov Valeriy — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, DrSci (Phys.Math.), head of laboratory. E-mail: pimval@mail.ru.

Demin Aleksandr — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, junior research worker. E-mail: cash@bk.ru.

Gribkov Vladimir — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, DrSci (Phys.Math.), leading research worker, professor. E-mail: gribkovv@rambler.ru.

Maslyaev Sergey — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, PhD, senior research worker. E-mail: maslyaev@mail.ru.

Dyomina Elena — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, DrSci (Eng.), leading research worker. E-mail: elenadyom@mail.ru.

Lyakhovitskiy Mark — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, PhD, senior research worker. E-mail: markl@yandex.ru.

Sasinovskaya Irina — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, research worker. E-mail: porfirievna@mail.ru.

Sprygin Georgiy — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, research worker. E-mail: engaer@rambler.ru.

Tikhonov Aleksandr — HSE Moscow Institute of Electronics and Mathematics, DrSci (Phys.Math.). E-mail: atikhonov@hse.ru.

Bondarenko Gennadiy — HSE Moscow Institute of Electronics and Mathematics, DrSci (Phys.Math.), professor. E-mail: gbondarenko@hse.ru.

Gaydar Anna — Scientific research institute of advanced materials and technology, senior research worker. E-mail: niipmt@mail.ru.