

Анализ вещества

УДК 621.795

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ПОСЛОЙНОГО АНАЛИЗА СТАЛИ 12Х18Н10Т ПОСЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

© В. В. Плихунов¹, К. В. Григорович², Л. М. Петров¹, А. М. Арсенкин²,
Г. С. Спрыгин², Я. Я. Химюк,² К. Ю. Демин², В. Д. Семенов¹

Статья поступила 20 сентября 2016 г.

В работе изучены свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т, сформированного при технологическом воздействии потоков аргоновой плазмы. С помощью методов атомно-эмиссионной спектromетрии с тлеющим разрядом, рентгеновского микроанализа и Оже-спектроскопии показано, что воздействие плазменных потоков способствует перераспределению элементного состава сплава в поверхностном слое, особенно в наноразмерном поверхностном диапазоне.

Ключевые слова: поверхностный слой; атомно-эмиссионная спектromетрия; рентгеновский микроанализ; технологические воздействия; твердость; послойный химический анализ; Оже-электронная спектроскопия.

Надежность работы деталей из стали типа 12Х18Н10Т во многом определяется свойствами поверхностного слоя, формируемого в процессах различной поверхностной обработки и отличающегося от основного материала как условиями предшествующей обработки (термической, механической, химической и др.), так и особенностями воздействий инструмента и окружающей среды [1 – 3].

Качество формируемой в ходе внешних воздействий поверхности и поверхностного слоя оценивается: твердостью, дефектностью, степенью шероховатости, степенью загрязнения органическими и неорганическими примесями, наличием оксидов и окалины, морфологией. Состояние поверхности и поверхностного слоя, определяемого технологическими инструментальными воздействиями, формирует технологическую наследственность [4], выражающуюся в переносе свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим, что способствует изменению свойств поверхности. Технологические воздействия могут разделяться межоперационными переходами, которые являются их своеобразными «барьерами», позволяющими формировать конечные свойства материала [5].

Создание барьерных слоев в поверхностном слое сталей является важным моментом в обеспечении их

эксплуатационных свойств и может осуществляться с помощью различных технологических операций, в том числе комплексных, в определенной последовательности сочетающих различные воздействия рабочих сред на обрабатываемую поверхность. Такие воздействия, подразделяемые на предварительные и окончательные (финишные), позволяют более полно использовать все особенности поверхностного слоя в целях обеспечения заданных функциональных свойств в условиях эксплуатации.

При изготовлении деталей авиационной техники и машиностроения в качестве предварительных технологических инструментальных воздействий широко применяют различные методы поверхностной обработки, а в качестве финишной рекомендуется вакуумная ионно-плазменная (ВИП) поверхностная обработка. Данный вид поверхностной обработки обладает значительными технологическими возможностями за счет воздействия на материалы потоков аргоновой плазмы в широком диапазоне энергий. Это позволяет существенно влиять на исходную технологическую наследственность обрабатываемой поверхности металлических материалов.

Металловедческие аспекты технологического воздействия ускоренных потоков аргоновой плазмы на обрабатываемую поверхность и их роль в изменении физико-химических и механических свойств исходного поверхностного слоя и формировании покрытий изучены недостаточно полно. Особенно это относится к исследованиям влияния потоков плаз-

¹ Национальный институт авиационных технологий, Москва, Россия; e-mail: plm@niat.ru

² Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва, Россия; e-mail: grigorovichkv@gmail.com

мы на изменение свойств обрабатываемой поверхности сталей, так как взаимодействие плазменных потоков с поверхностью является первичным в процессе технологического воздействия, и его эффективность определяет конечный результат ВИП обработки [6 – 12].

Таким образом, актуальной задачей является изучение механизмов формирования как самих функциональных поверхностей, так и сопутствующих надповерхностных слоев при технологическом воздействии плазменных потоков на обрабатываемую поверхность.

В настоящей работе рассмотрены вопросы изменения свойств поверхности и поверхностных слоев стали 12X18H10T при технологических воздействиях высокоэнергетических потоков аргоновой плазмы, обеспечивающих создание градиентных структур, обладающих повышенными твердостью и износостойкостью за счет обогащения поверхности элементами внедрения, создания на их основе твердых растворов внедрения, а также покрытий.

Материалы и методика эксперимента. Исследовали дисковые образцы из материалов 12X18H10T, полученных по промышленной технологии. Модельные образцы диаметром 20 и толщиной 5 мм имели исходное структурное состояние поверхностного слоя, формируемое в процессе инструментального лезвийного воздействия, со значением шероховатости поверхности $Ra = 2$ мкм. Обработку поверхности образцов потоками аргоновой плазмы проводили с использованием модернизированной установки ННВ-6.6 в различных режимах ВИП обработки, воздействуя на обрабатываемую поверхность в течение 30 мин электронным (опорное напряжение — +65 В) и ионным (опорное напряжение — –500 В) потоками аргоновой плазмы. Энергетическое состояние поверхности после технологического инструментального воздействия, а также воздействий электронной и ионной составляющих плазмы оценивали по величине приведенного поверхностного потенциала, измеренного во временном интервале 0 – 100 мкс. Оценку изменений твердости поверхностного слоя после воздействия плазменных потоков выполняли с помощью прибора Micro met 5101 при изменении нагрузок на индентор от 0,098 до 9,8 Н путем индентирования поверхности с поэтапным увеличением нагрузки. Рельеф поверхностного слоя после технологических воздействий в различных режимах определяли с использованием цифрового измерителя шероховатости поверхности класса точности 2 типа TR200. Количественный послойный анализ поверхности и поверхностного слоя на глубину 0,01 – 25 мкм проводили с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с тлеющим разрядом GDS 850A (LECO). Исследование структуры и локальный химический анализ поверхности проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа с рентгеновским микроанализом JEOL JSM 6610LV при ускоряющем напряжении 20 кВ. Химический

состав структурных составляющих на поверхности образцов исследовали методом Оже-электронной спектроскопии с помощью спектрометра JEOL JAMP 9500F при ускоряющем напряжении 10 кВ.

Изготовление деталей из стали 12X18H10T, как правило, связано с использованием различных технологий обработки, изменяющих структуру, химический состав и свойства обрабатываемой поверхности. Получающаяся при этом поверхность стали характеризуется новым уровнем шероховатости, величинами деформационных упрочнений и остаточными напряжениями. Глубина изменений, происходящих в поверхностном слое, и качество создаваемой поверхности зависят от типа обрабатываемого материала, вида обработки, основных параметров инструмента, режима обработки и используемых смазочно-охлаждающих жидкостей. При этом формируется сложная структура поверхности материала.

Создаваемый при обработке поверхностный слой, как правило, неоднороден по своему строению. Так, внешний слой состоит из хемосорбированных газов, влаги, частиц и смазочно-охлаждающей жидкости. Поверхностный слой имеет сложную структуру, состоящую из слоя сильно деформированного металла и участков с измененным под воздействием температур механической обработки химическим составом слоя, который включает зерна, деформированные под воздействием давления, и металл с исходной структурой. Толщина слоев и степень их дефектности зависят от режимов и вида технологических воздействий.

Проведенные измерения микротвердости показали, что инструментальные воздействия в процессе лезвийной поверхностной обработки способствовали протеканию сдвиговых процессов в обрабатываемом поверхностном слое, что привело к деформационному наклепу поверхностного слоя стали 12X18H10T, в результате чего произошло его упрочнение (рис. 1). Зона упрочнения, характеризуемая повышенным значением твердости, ограничивается областью нагрузок до 2 Н (микрообласть), а область нагрузок от 2 до 10 Н (макрообласть) характеризуется стабильностью значений твердости, свойственной объемной исходной недеформированной структуре исследуемого материала. Проведенный количественный послойный анализ показал, что на поверхности наблюдается повышенное содержание (до 60 % ат.) углерода, а также кислорода, азота и кремния, что, очевидно, обусловлено загрязненностью поверхности органическими веществами, внесенными в процессе механической обработки. Толщина данного слоя не превышает 20 нм (рис. 2).

Сформированная таким образом структура поверхностного слоя стали 12X18H10T является финишной и обладает определенной технологической наследственностью. Первичные изменения поверхностной структуры и свойств, осуществляемые в предшествующих технологических процессах изготовления деталей (механообработка, формообразование,

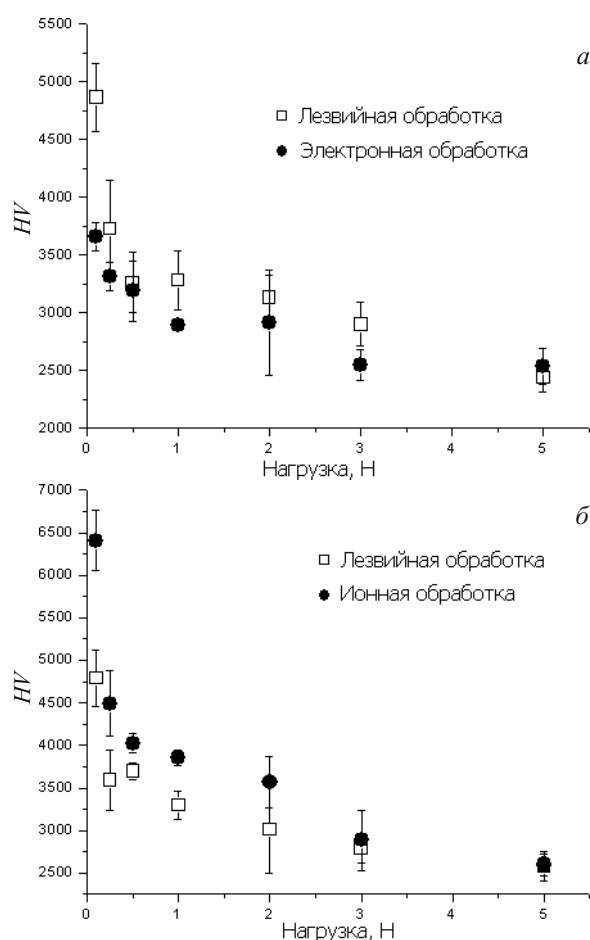


Рис. 1. Зависимость твердости поверхности образца стали 12X18N10T, сформированной в процессе лазерной обработки, от режима воздействия аргоновой плазмы: *а* — обработка электронным потоком — 30 мин; *б* — обработка ионным потоком — 30 мин

процессы упрочнения), необходимо учитывать, так как наличие таких измененных свойств поверхности и поверхностного слоя может являться определяющим при последующей ВИП обработке.

Процесс создания покрытий связан с необходимостью тщательного удаления адсорбированных слоев и оксидов на этапе очистки и активации обрабатываемой поверхности, осуществляемом в процессе технологического воздействия потоков аргоновой плазмы. Проведение ВИП обработки требует учета состояния исходной поверхности, образуемой в процессе изготовления детали [13, 14], так как изменение технологической наследственности обрабатываемого поверхностного слоя происходит за счет последующих преобразований состава и структуры поверхностного слоя. Глубина слоя зависит от энергетических параметров потоков плазмы и времени ее воздействия [15, 16].

Эффективность технологических воздействий на обрабатываемую поверхность при ВИП обработке определяется энергией воздействия электронно-ионных потоков плазмы. Результатом такого воздействия является нагрев поверхностного слоя, вследствие чего

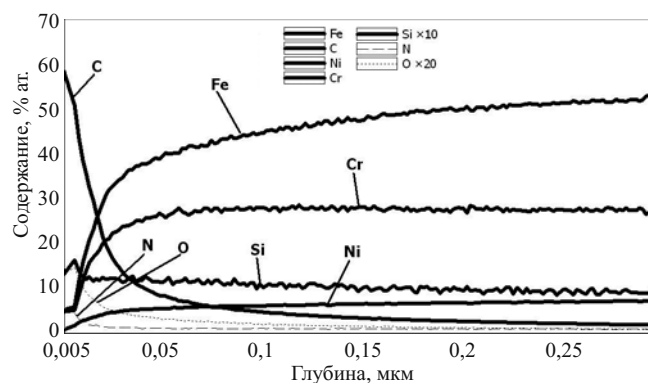


Рис. 2. Распределение элементов сплава 12X18N10T в поверхностном слое глубиной 0,3 мкм

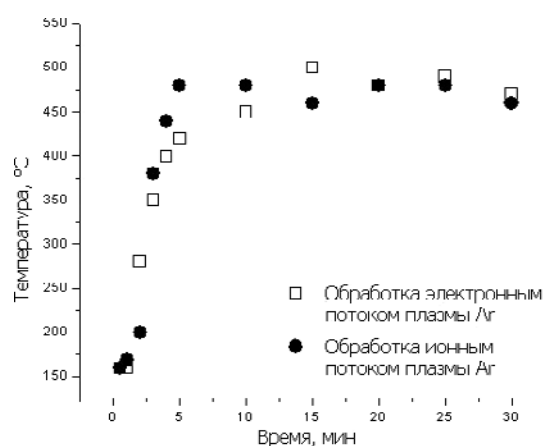


Рис. 3. Зависимость температуры нагрева поверхности стали 12X18N10T от режима технологического воздействия компонентов аргоновой плазмы

активируются диффузионные процессы в поверхности и происходят структурные и физико-химические изменения.

На рис. 3 приведены результаты измерения температуры поверхности образца при технологическом воздействии электронного и ионного потоков плазмы аргона: обрабатываемая поверхность стали 12X18N10T в течение 15 мин нагревается до 500 °C. При этом значение приведенного поверхностного потенциала $V_{\text{п}}$, измеренное на обработанной поверхности стали, изменилось от -80 мВ до $+240$ мВ (рис. 4), что указывает на эффективность воздействия электронного потока, удалившего с поверхности оксиды и адсорбированные вещества. Однако нагрев поверхностного слоя привел к устранению наклепа и в результате — к некоторому уменьшению твердости поверхностного слоя (см. рис. 1, *а*).

Технологическое воздействие ионного потока плазмы аргона обеспечило выход на температуру нагрева поверхности 500 °C в течение 5 мин (см. рис. 3), при этом значение приведенного поверхностного потенциала $V_{\text{п}}$ обработанной плазмой поверхности стали изменилось от -80 до $+140$ мВ (см. рис. 4). В ре-

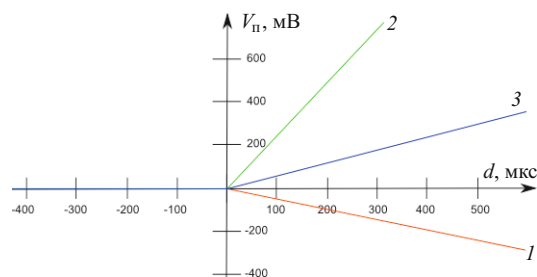


Рис. 4. Зависимость приведенного поверхностного потенциала V_p стали 12X18H10T от состояния поверхности после технологических воздействий: 1 — лезвийная обработка; 2 — обработка электронным потоком плазмы Ar (30 мин); 3 — обработка ионным потоком плазмы Ar (-500 В, 30 мин)

зультате произошло повышение твердости поверхностного слоя, что указывает на его существенные изменения (см. рис. 1, б).

Зависимость приведенного поверхностного потенциала от технологического воздействия электронной или ионной составляющих потока плазмы (см. рис. 4) указывает на то, что в процессе таких воздействий на обрабатываемой поверхности проходят физико-химические процессы, способствующие изменению ее энергетического состояния. Количественный послойный анализ химического состава поверхности и поверхностного слоя стали 12X18H10T с помощью спектрометра GDS 850A подтвердил данное предположение (рис. 5). Так, обработка электронным потоком плазмы аргона (опорное напряжение на образце — +65 В) способствовала обратной диффузии хрома и кремния к поверхности образца — повышению содержания Cr на глубине около 0,03 мкм и образованию области с повышенным содержанием Si на глубине около 0,1 мкм, превышающим его содержание в образце после лезвийной обработки на данной глубине в 4 раза. Было отмечено увеличение содержания азота, углерода и кислорода в поверхностном слое на глубине до 50 нм (см. рис. 5, а). Изменение содержания кислорода, по-видимому, обусловлено частичным окислением поверхности во время обработки.

После обработки электронным потоком содержание углерода на поверхности уменьшилось по сравнению с образцом после лезвийной обработки с 60 до 45 % ат. При этом изменилась форма профиля содержания углерода, что указывает на произошедший процесс диффузии углерода и азота от поверхности на глубину образца до 80 нм.

Образцы стали, обработанные ионным потоком, характеризовались повышенным содержанием кислорода и азота по сравнению с образцом после лезвий-

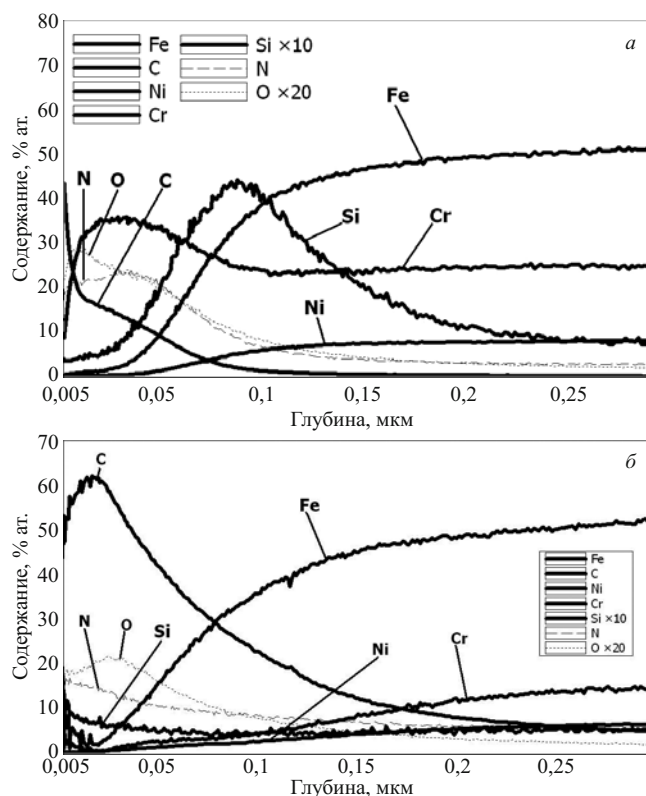


Рис. 5. Распределение элементов сплава 12X18H10T в поверхностном слое глубиной 0,3 мкм при технологическом воздействии электронного потока плазмы аргона (30 мин) (а) и ионного потока (-500 В, 30 мин) (б)

ной обработки. При этом значимых различий содержания кислорода и азота в поверхности образцов после обработки электронным и ионным потоками обнаружено не было. Обработка ионным потоком интенсифицировала процесс диффузии углерода. Произошло насыщение углеродом приповерхностного слоя с максимальным содержанием около 60 % ат. на глубине 30 нм и уширение диффузионной зоны до 200 нм (см. рис. 5, б). Подтверждением такого эффекта стало повышение твердости поверхностной микрообласти (см. рис. 3).

Результаты анализа образцов методом растровой электронной микроскопии показали, что поверхность образца, обработанного ионным потоком, отличалась от поверхности образца стали, подвергнутого бомбардировке электронным потоком. В первом случае на поверхности присутствовали глобулярные частицы оксидов железа двух размерных групп: 100 нм и 1–2 мкм (рис. 5, таблица). Кроме того, на поверхности были также обнаружены частицы нитрида титана размером до 10 мкм, которые выявились в результате травления ионным потоком (рис. 6, в). Поверхность образца, подвергнутого обработке электронным потоком, отличалась большей микрошероховатостью и отсутствием частиц (рис. 7).

Исследование поперечных шлифов методом Оже-электронной спектроскопии с использованием спектрометра JUMP JEOL 9500F показало, что на по-

Химический состав частиц на рис. 6, а

Номер точки на поверхности	Содержание, % ат.		
	C	O	Fe
1	30,9	36	33,1
3	9,8	47,1	43,1

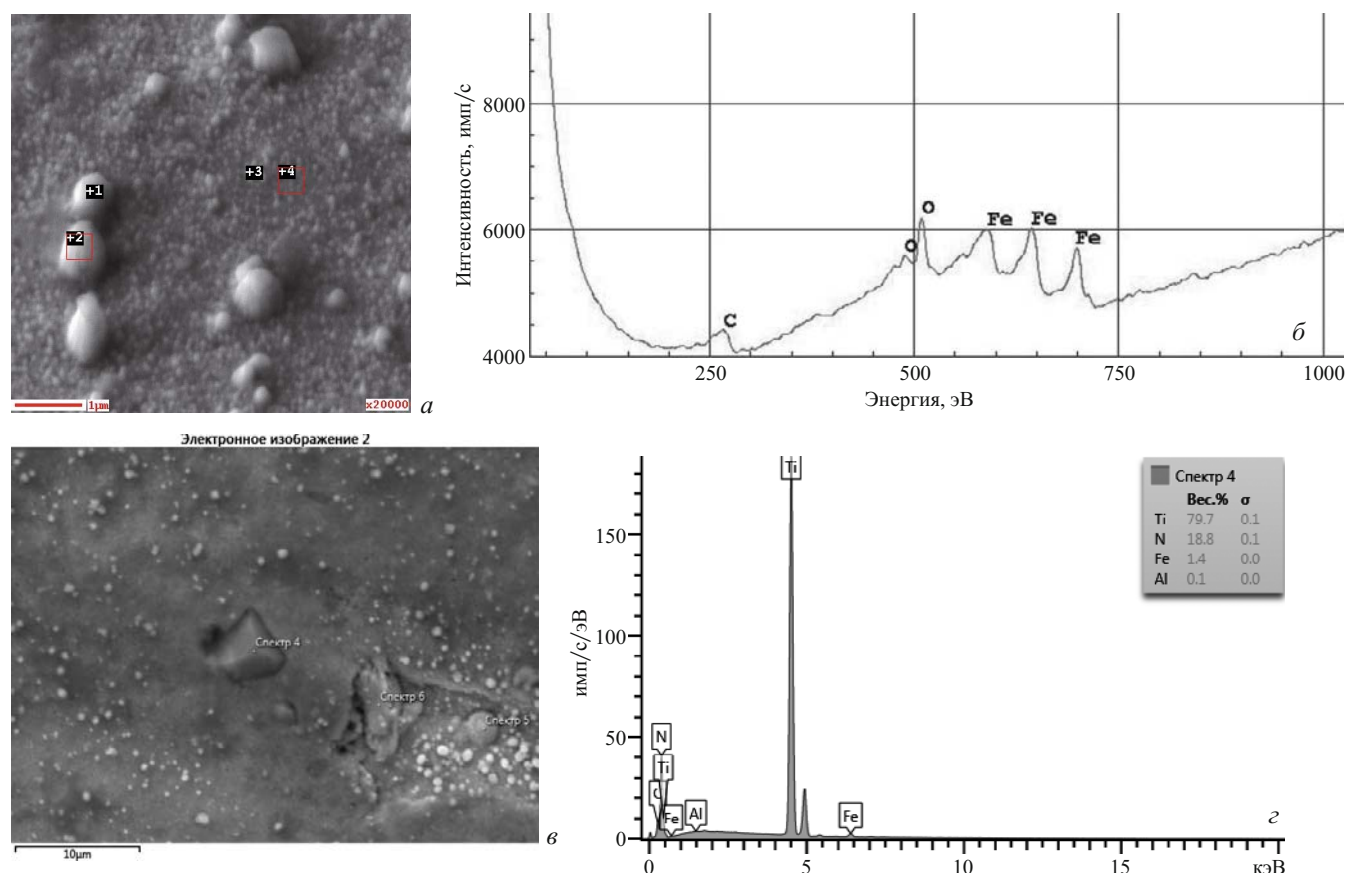


Рис. 6. Изображение частиц оксидов железа на поверхности образца стали 12X18H10T, подвергнутого обработке ионным потоком (а), их Оже-спектр (б), изображение включений нитрида титана, вытравленных в результате обработки (в) и их рентгеновский спектр (г)

верхности образца, подвергнутого обработке электронным потоком, присутствуют слой оксида железа и хрома, а также частицы нитрида кремния (рис. 8) (O — 20,1; Fe — 8,5; Cr — 14,6; N — 35,8; Si — 21,0 % ат.). В слое под поверхностью на глубине около 1 мкм были обнаружены мелкие (<1 мкм) частицы оксидов кремния и алюминия (O — 24,6; Fe — 35,4; Cr — 12,8; Al — 10,5; Si — 16,6 % ат.), а на глубине до 2 мкм — нитрида хрома (O — 20,4; Fe — 35,6; Cr — 12,1; N — 31,9 % ат.) (рис. 9). В образце, обработанном ионным потоком, в поверхностном слое до 2 мкм были обнаружены частицы оксикаридов титана (C — 66,1; Ti — 28,3; O — 5,6 % ат.) (рис. 10). Повышенное содержание углерода в составе частиц, вероятно, связано с присутствием механических загрязнений.

По-видимому, формированием этих частиц при ВИП обработке объясняется увеличение содержания соответствующих элементов в приповерхностной зоне, установленное количественным послойным анализом.

Таким образом, в работе установлено наличие первичных изменений поверхностной структуры, химического состава и свойств образцов стали 12X18H10T, вызванных технологическими процессами изготовления деталей. Показано, что наличие таких изменений может являться определяющим фак-

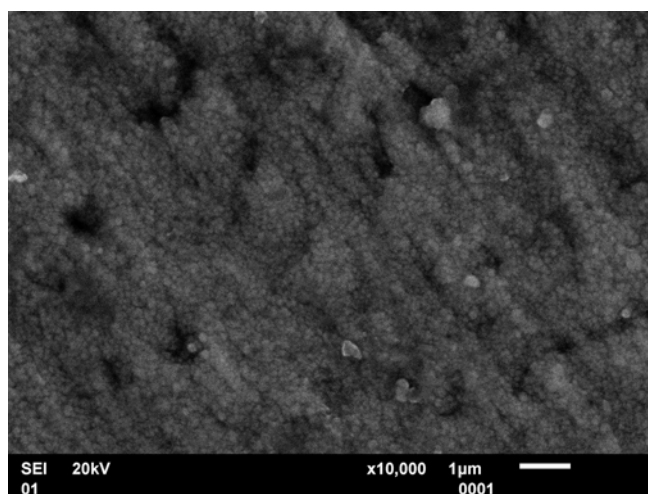


Рис. 7. Изображение поверхности образца стали 12X18H10T, подвергнутого обработке электронным потоком

тором в процессах последующей ионно-вакуумной химико-термической обработки.

Процесс создания внутренних (модифицированных) и других видов покрытий связан с необходимостью тщательного удаления адсорбированных слоев и оксидов на этапе очистки и активации обрабатываемой поверхности при технологическом воздействии потоков аргонной плазмы.

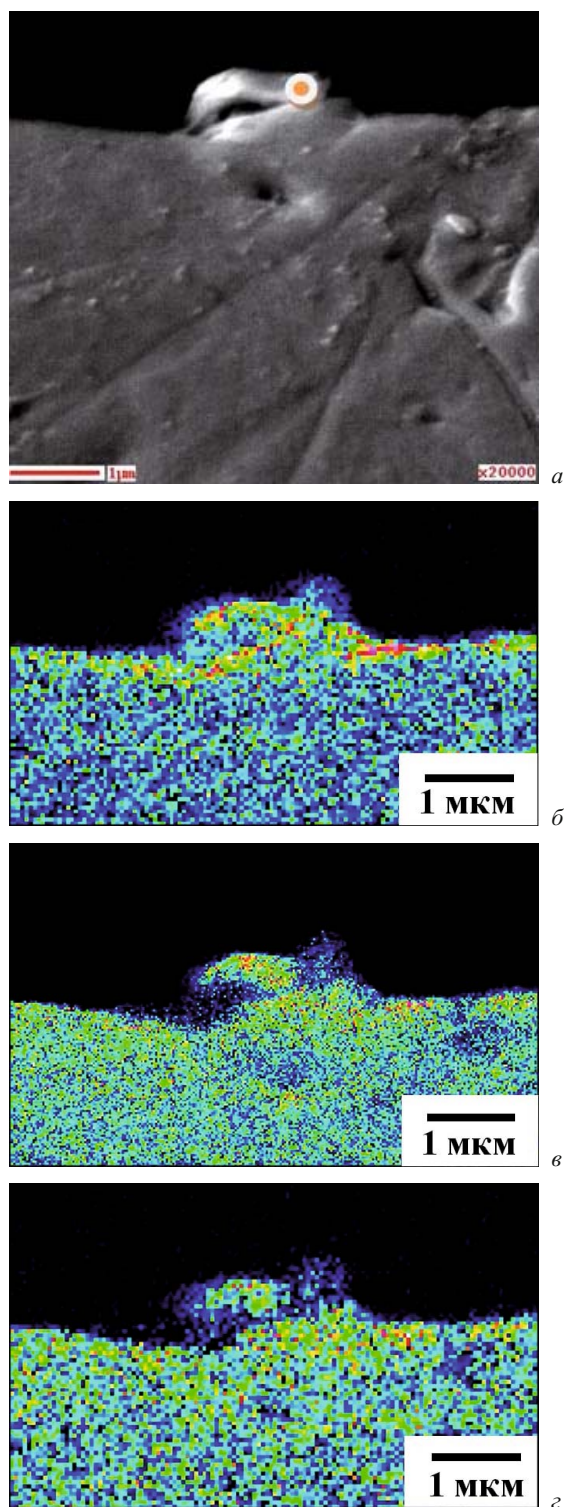


Рис. 8. Изображение приповерхностной зоны образца, подвергнутого обработке электронным потоком (*а*), карта распределения в сигнале Оже-электронов кислорода (*б*), железа (*в*), хрома (*г*)

Обработка потоками плазмы аргона способствует нагреву обрабатываемой поверхности, интенсификации процессов диффузии и росту приведенного поверхностного потенциала V_n , что указывает на протекание физико-химических процессов, таких как удале-

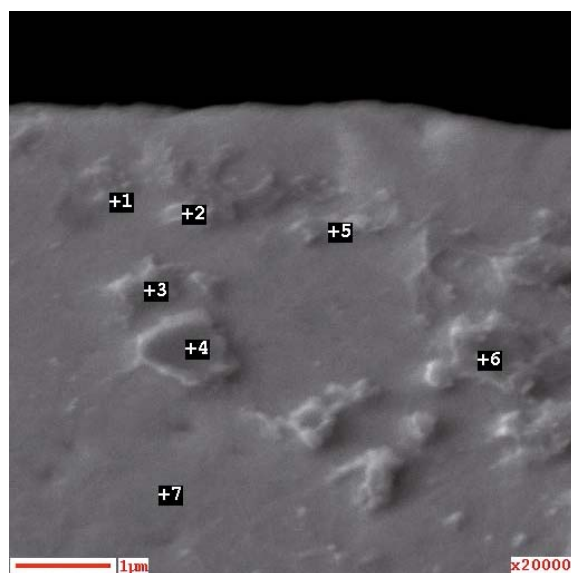


Рис. 9. Изображение частиц оксидов и нитридов в приповерхностной зоне образца, подвергнутого обработке электронным потоком



Рис. 10. Изображение частиц оксикарида титана в приповерхностной зоне образца, подвергнутого обработке ионным потоком

ние адсорбатов и оксидных пленок, что обуславливает изменение энергетического состояния поверхности.

Обработка поверхности образцов электронным потоком аргоновой плазмы приводила к повышению содержания Cr на глубине около 0,03 мкм и образованию области с повышенным содержанием Si на глубине около 0,1 мкм, превышающим его содержание в образце после лезвийной обработки на данной глубине в 4 раза. Кроме этого, было отмечено увеличение содержания кислорода и азота в поверхностном слое на глубину до 50 нм, что, по-видимому, обусловлено процессами окисления поверхности во время или после обработки.

После обработки электронным потоком содержание углерода, адсорбированного на поверхности, уменьшилось по сравнению с образцом после лезвийной обработки с 60 до 45 % ат. При этом изменилась форма профиля содержания углерода, что указывает на имевшую место диффузию углерода и азота от поверхности вглубь.

Обработка образцов стали ионным потоком привела к повышению содержания кислорода и азота в поверхностном слое по сравнению с образцом после лезвийной обработки. При этом значимых различий в содержании кислорода и азота в образцах после обработки электронным и ионным потоками обнаружено не было. Обработка ионным потоком интенсифицировала процесс диффузии углерода, что привело к насыщению углеродом приповерхностного слоя с достижением максимального содержания около 60 % ат. на глубине 30 нм и уширению диффузионного слоя. Это нашло свое подтверждение в повышении твердости данной микрообласти поверхности.

Морфология поверхности образцов после обработки электронным и ионным потоками различалась: в последнем случае на поверхности были обнаружены частицы оксидов железа размером от 100 нм до 1–2 мкм.

Оже-электронная спектроскопия позволила обнаружить в приповерхностных зонах исследуемых образцов наноразмерные частицы оксидов, нитридов и оксикаридов, что объясняет увеличение содержания соответствующих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. — М.: Машиностроение, 1975. — 225 с.
2. Калинин Б. А., Якушин В. Л., Польский В. И. и др. Упрочнение поверхности и повышение износостойкости металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы / Физика и химия обработки материалов. 2010. № 2. С. 21–27.
3. Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. — М.: Техносфера, 2012. — 464 с.
4. Яшерин П. И., Рыжов Э. В., Аверченко В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. — Минск: Наука и техника, 1977.
5. Вейко В. П., Смирнов В. Н., Чирков А. М., Шахно Е. А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. — СПб.: НИУ ИТМО, 2013. — 103 с.
6. Ильин А. А., Плихунов В. В., Петров Л. М. и др. Очистка и активация поверхности изделий из конструкционных металлических материалов в процессе вакуумной ионно-плазменной обработки / Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 111–117.
7. Ильин А. А., Плихунов В. В., Петров Л. М. и др. Особенности подготовки поверхности титановых сплавов при вакуумной ионно-плазменной обработке / Авиационная промышленность. 2006. № 4. С. 23–26.
8. Петров Л. М., Плихунов В. В. Реакционная способность поверхностного слоя конструкционных металлических материалов на этапе ионного травления при ВП-обработке / Авиационная промышленность. 2012. № 2. С. 9–13.
9. Плихунов В. В., Петров Л. М. Структурные изменения поверхностного слоя конструкционных материалов в процессе вакуумной ионно-плазменной обработки / Авиационная промышленность. 2011. № 3. С. 3–6.

10. Петров Л. М., Белофен С. Я., Спектор В. С. и др. Вакуумная ионно-плазменная обработка нержавеющей стали / Технология легких сплавов. 2007. № 3. С. 113–118.
11. Oliveira R. M., Fernandes B., Carreri F. C. Surface modification of NiTi by plasma based ion implantation for application in harsh environments / Appl. Surf. Sci. 2012. Vol. 263. P. 763–768.
12. Remnev A. G., Uemura K., Shalnov, et al. Electron Beam and Ion-Plasma Treatment of Pain-Less Syringe Needle / Proc. 10 Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Sept. 19–24, 2010. — Tomsk, 2010. P. 278–281.
13. Плихунов В. В., Петров Л. М., Иванчук С. Б. и др. Оборудование, технологии и методы контроля для осуществления комплексного подхода к формированию многофункциональных покрытий и модифицированных слоев методом вакуумной ионно-плазменной обработки / Сб. докладов IX научной конференции по гидроавиации «Гидро-авиасалон-2010», 5–6 сентября 2010 г., Геленджик, Россия. С. 188–193.
14. Borisov D. P., Koval N. N., Korotaev A. D., et al. Vacuum-plasma technologies for high-quality surface-treatment applications / Изв. вузов. Физика. 2012. № 12/2. С. 29–33.
15. Плихунов В. В., Петров Л. М., Иванчук С. Б. и др. Оценка структурного состояния поверхности титановых сплавов по изменению величины поверхностного потенциала / Международная конференция «Ti-2009 в СНГ», 17–20 мая 2009 г., Одесса. С. 348–352.
16. Ильин А. А., Плихунов В. В., Петров Л. М. Формирование энергетического состояния поверхности конструкционных материалов при вакуумной ионно-плазменной обработке / Авиационная промышленность. 2011. № 2. С. 7–11.

REFERENCES

1. Dal'skii A. M. Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnykh detalei mashin [Technological ensuring the reliability of high-precision machine parts]. — Moscow: Mashinostroenie, 1975. — 225 p. [in Russian].
2. Kalin B. A., Yakushin V. L., Pol'skii V. I., et al. Uprochnenie poverkhnosti i povyshenie iznosostoikosti metallicheskih materialov pri obrabotke potokami vysokotemperaturnoi impul'snoi plazmy [Hardening of the surface and increasing the wear resistance of metallic materials in the processing of high-temperature pulsed plasma flows] / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 2010. N 2. P. 21–27 [in Russian].
3. Berlin E. V., Koval' N. N., Seidman L. A. Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka poverkhnosti stal'nykh detalei [A plasma thermochemical treatment of steel details surface]. — Moscow: Tekhnosfera, 2012. — 464 p. [in Russian].
4. Yashcheritsin P. I., Ryzhov É. V., Averbchenko V. I. Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroenii [Technological heredity in mechanical engineering]. — Minsk: Nauka i tekhnika, 1977 [in Russian].
5. Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M., Shakhno E. A. Lazernaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii [Laser cleaning in mechanical engineering and instrument making]. — St. Petersburg: Izd. NIU ITMO, 2013. — 103 p. [in Russian].
6. Il'in A. A., Plikhunov V. V., Petrov L. M., et al. Ochistka i aktivatsiya poverkhnosti izdelii iz konstruksionnykh metallicheskih materialov v protsesse vakuumnoi ionno-plazmennoi obrabotki [Cleaning and surface activation of products made of structural metal materials during vacuum ion-plasma treatment] / Tekhnol. Legk. Splav. 2009. N 2. P. 111–117 [in Russian].
7. Il'in A. A., Plikhunov V. V., Petrov L. M., et al. Osobennosti podgotovki poverkhnosti titanovykh spлавov pri vakuumnoi ionno-plazmennoi obrabotke [Features of preparation of titanium alloys surface by vacuum ion-plasma treatment] / Aviats. Promysl. 2006. N 4. P. 23–26 [in Russian].
8. Petrov L. M., Plikhunov V. V. Reaktsionnaya sposobnost' poverkhnostnogo sloya konstruksionnykh metallicheskih materialov na etape ionnogo travleniya pri VIP obrabotke [The reactivity of the surface layer of constructional metallic materials ion etching step during VIP processing] / Aviats. Promysl. 2012. N 2. P. 9–13 [in Russian].
9. Plikhunov V. V., Petrov L. M. Strukturnye izmeneniya poverkhnostnogo sloya konstruksionnykh materialov v protsesse vakuumnoi ionno-plazmennoi obrabotki [Structural changes in the surface layers of constructional materials during vacuum ion-plasma treatment] / Aviats. Promysl. 2011. N 3. P. 3–6 [in Russian].
10. Petrov L. M., Betsofen S. Ya., Spektor V. S., et al. Vakuumnaya ionno-plazmennaya obrabotka nerzhavayushchikh stalei [Vacuum ion-plasma treatment of stainless steels] / Tekhnol. Legk. Splav. 2007. N 3. P. 113–118 [in Russian].

11. **Oliveira R. M., Fernandes B., Carreri F. C.** Surface modification of NiTi by plasma based ion implantation for application in harsh environments / *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 263. P. 763 – 768.
12. **Remnev A. G., Uemura K., Shalnov, et al.** Electron Beam and Ion-Plasma Treatment of Pain-Less Syringe Needle / *Proc. 10 Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*, Sept. 19 – 24, 2010. — Tomsk, 2010. P. 278 – 281.
13. **Plikhunov V. V., Petrov L. M., Ivanchuk S. B., et al.** Oborudovanie, tekhnologii i metody kontrolya dlya osushchestvleniya kompleksnogo podkhoda k formirovaniyu mnogofunktsional'nykh pokrytii i modifitsirovannykh sloev metodom vakuumnoi ionno-plazmennoi obrabotki [Equipment, technologies and control methods for the implementation of an integrated approach to the development of multi-functional coatings and the modified layers by vacuum ion-plasma treatment] / *Proc. of the IX Sci. Conf. on Hydroaviation «Gidro-aviasalon-2010»*, 5 – 6 sentyabrya 2010 g., Gelendzhik, Russia. P. 188 – 193 [in Russian].
14. **Borisov D. P., Koval N. N., Korotaev A. D., et al.** Vacuum-plasma technologies for high-quality surface-treatment applications / *Izv. Vuzov. Fiz.* 2012. N 12/2. P. 29 – 33.
15. **Plikhunov V. V., Petrov L. M., Ivanchuk S. B., et al.** Otsenka strukturnogo sostoyaniya poverkhnosti titanovykh splavov po izmeneniyu velichiny poverkhnostnogo potentsiala / *Int. Conf. «Ti-2009 in CIS»*, May 17 – 20, 2009, Odessa. P. 348 – 352 [in Russian].
16. **Il'in A. A., Plikhunov V. V., Petrov L. M.** Formirovanie énergeticheskogo sostoyaniya poverkhnosti konstruksionnykh materialov pri vakuumnoi ionno-plazmennoi obrabotke [Formation of the energy state of the surface of structural materials during vacuum ion-plasma treatment] / *Aviats. Promyshl.* 2011. N 2. P. 7 – 11 [in Russian].