



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.785.532: 539.12

**А.Н. ГРИГОРЧИК**

аспирант, младший научный сотрудник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения<sup>1</sup>

**В.А. КУКАРЕКО**, д-р физ.-мат. наук, доцент

начальник центра Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения<sup>1</sup>

E-mail: v\_kukareko@mail.ru

**А.В. БЕЛЫЙ**, д-р техн. наук, член-корр. НАН Беларуси

заместитель директора<sup>2</sup>

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, доцент

заведующий лабораторией<sup>1</sup>

**Б.Б. ХИНА**, д-р физ.-мат. наук, доцент

главный научный сотрудник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13.04.2016.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИФФУЗИИ АЗОТА В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО АЗОТИРОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 06Х19Н9Т

*Изучено распределение атомов азота и хрома в поверхностных слоях газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т после ионно-лучевого азотирования при 870 К. Установлено, что напыленные частицы газотермического покрытия имеют различную концентрацию хрома. Показано, что в результате ионно-лучевого азотирования в частицах с высоким содержанием хрома формируются азотированные слои пониженной глубины. Проведена оценка коэффициентов диффузии атомов азота для случаев различной концентрации хрома в частицах. Показано, что коэффициент диффузии азота при ионно-лучевом азотировании существенно превышает коэффициент диффузии при газовом азотировании. Установлено, что величина коэффициента диффузии снижается с увеличением содержания хрома в напыленных частицах покрытия.*

**Ключевые слова:** газотермическое покрытие, ионно-лучевое азотирование, концентрация хрома, коэффициент диффузии

**Введение.** Газотермическое напыление является перспективным методом для получения покрытий, защищающих изделия от износа и коррозии. Однако, несмотря на достоинства способов газотермического напыления (высокий коэффициент использования материалов и производительность), износостойкость полученных покрытий существенно ниже, чем монолитных материалов. Для повышения триботехнических свойств газотермических покрытий целесообразно использовать ме-

тоды инженерии поверхности [1, 2]. В частности, перспективной и интенсивно развивающейся технологией упрочнения металлических материалов является низкоэнергетическое ионно-лучевое азотирование [2–5]. Метод низкоэнергетического ионно-лучевого азотирования основан на обработке материалов пучками ионов азота с энергией  $\sim 10^3$  эВ и с большими плотностями ионного тока ( $\sim 1 \div 10$  мА/см<sup>2</sup>). При этом в поверхностном слое обрабатываемого материала развиваются

процессы радиационно-стимулированной диффузии, обеспечивающие высокую скорость и глубину насыщения покрытий атомами азота, придающими поверхностным слоям высокую твердость и коррозионную стойкость [2–5]. В частности, авторами в работах [6–8] показано, что ионно-лучевое азотирование приводит к значительному возрастанию микротвердости и износостойкости газотермических покрытий из высокохромистых сталей. Авторами в работе [9] также установлено, что на поверхности покрытия формируется модифицированный слой переменной глубины с различной концентрацией атомов азота, обусловленной наличием оксидных барьеров на границах напыленных частиц и их размерами. Вместе с тем влияние содержания легирующих элементов в частицах покрытия на диффузионную подвижность атомов азота не учитывалось. В связи с этим представляло интерес подробно исследовать влияние содержания хрома на скорость диффузии атомов азота в различных участках газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T.

**Материал и методики исследований.** Исследования проводились на образцах, изготовленных из стали 45 (10×6×5 мм) с напыленным слоем из проволоочной стали 06X19H9T. Напыление гиперзвукового покрытия осуществлялось с помощью установки АДМ-10, разработанной в ОИМ НАН Беларуси [1]. Для напыления использовалась проволока диаметром ~2,0 мм. Скорость полета напыляемых частиц составляла ~400–500 м/с, размер частиц ~5–40 мкм.

Ионно-лучевая обработка осуществлялась на экспериментальной установке ФТИ НАН Беларуси с помощью ионного источника УВН-2М. Температура азотирования образцов покрытия — 870 К. Обработка проводилась ионной смесью, содержащей 30 % N<sup>+</sup> + 70 % N<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией ионов 1–3 кэВ. Плотность тока ионного пучка составляла 2 мА/см<sup>2</sup>, время обработки — 3 ч. Флюенс имплантированных ионов составлял  $F \approx 3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>.

Металлографические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN. Микроанализ проводился с помощью энергодисперсионного спектрометра X-Max 150 производства Oxford Instruments с программным обеспечением AZtec Automated. Точность определения химического состава составляла ±0,05–0,1 мас. %.

Оценку коэффициента диффузии атомов азота в газотермическом покрытии проводили методом Матано на основании данных микроанализа, полученных с помощью энергодисперсионного спектрометра.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Толщина напыленного покрытия из стали 06X19H9T составляла ~0,8 мм. Структура гиперзвукового газотермического покрытия характеризуется высокой плотностью (остаточная пористость не превышала 5 % об.%), а также относительно повышенным содержанием оксидов (до 25 об.%), располагающихся

на границах напыленных частиц (рисунок 1). Из рисунка 1 можно видеть, что газотермическое покрытие представляет собой слои напыленных металлических частиц с оксидными прослойками. Структура покрытия включает в себя как отдельные, обособленные оксидными прослойками частицы, так и конгломераты сплавленных между собой частиц. Сплавленные конгломераты формируются в процессе напыления за счет соударения частиц между собой и с напыляемой поверхностью. При этом окисленные частицы сплющиваются, а оксидные слои растрескиваются, отслаиваются и частично перераспределяются на поверхности [1]. В местах разрушения и отслаивания оксидных слоев происходит сплавление контактирующих частиц с образованием конгломератов, внутри которых частицы не разделены сплошными непроницаемыми для диффузии оксидными прослойками.

Химический микроанализ напыленных частиц покрытия из аустенитной стали 06X19H9T показывает, что содержание хрома в различных частицах существенно различается (рисунок 2). В частности, из рисунка 2 можно видеть, что концентрация хрома в различных частицах покрытия может колебаться ~11–19 мас. % (12–21 ат. %). Различие в содержании хрома в разных частицах покрытия связано с их неравномерным окислением в процессе газотермического напыления. На рисунке 3 представлен

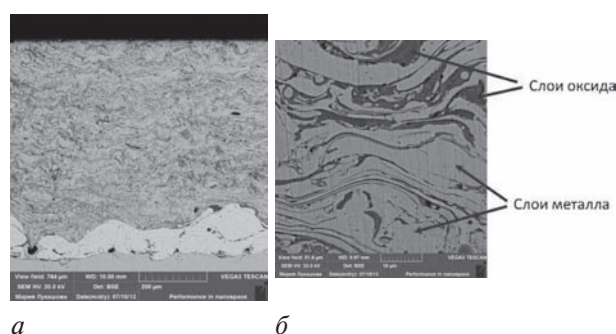


Рисунок 1 – Микроструктуры газотермического покрытия из стали 06X19H9T в исходном состоянии

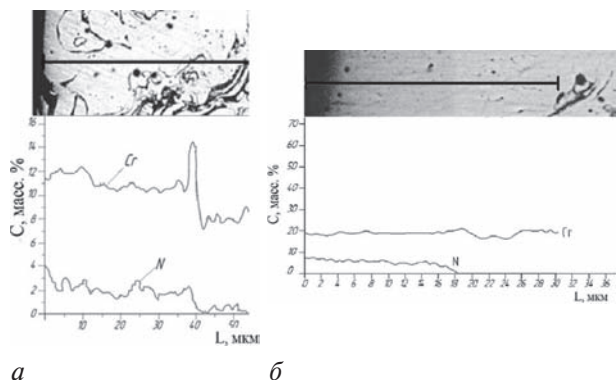


Рисунок 2 — Изменение концентрации (С) азота и хрома по глубине (L) газотермического покрытия из стали 06X19H9T, прошедшего ионно-лучевую обработку при 870 К (3 ч): а — глубина азотированного слоя составляет ~40 мкм; б — глубина азотированного составляет ~18 мкм

химический состав локального участка газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т. Можно видеть, что наряду с легированными хромом оксидами железа, в покрытии также образуются оксиды хрома (см. рисунки 2, 3), что может приводить к существенному понижению концентрации этого легирующего элемента в металлической частице. При этом в участках покрытий, содержащих конгломераты мелких сплавленных частиц (см. рисунок 2 а), регистрируется пониженное содержание хрома. В то же время в крупной частице (см. рисунок 2 б) концентрация хрома находится на уровне номинального значения. Причиной пониженного содержания хрома в мелких напыленных частицах может являться их большая удельная поверхность, что приводит к возрастанию потерь на окисление при распылении мелких частиц по сравнению с крупными частицами. В результате в мелких частицах существенно уменьшается содержание хрома вследствие его высокого сродства к кислороду [10], содержащемуся в распыляющей среде, что видно на рисунке 2.

В процессе последующего ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т в нем формируется модифицированный слой глубиной до 45–50 мкм [8]. Результаты электронной сканирующей микроскопии обработанного ионами азота покрытия из стали 06Х19Н9Т показывают, что в случае присутствия в поверхностном слое сплавленных конгломератов из мелких напыленных частиц, характеризующихся пониженным содержанием хрома и не разделенных сплошными оксидными прослойками, глубина азотированного слоя может достигать ≈40 мкм (см. рисунок 2 а). В то же время в крупных частицах покрытия из стали 06Х19Н9Т с содержанием хрома близким

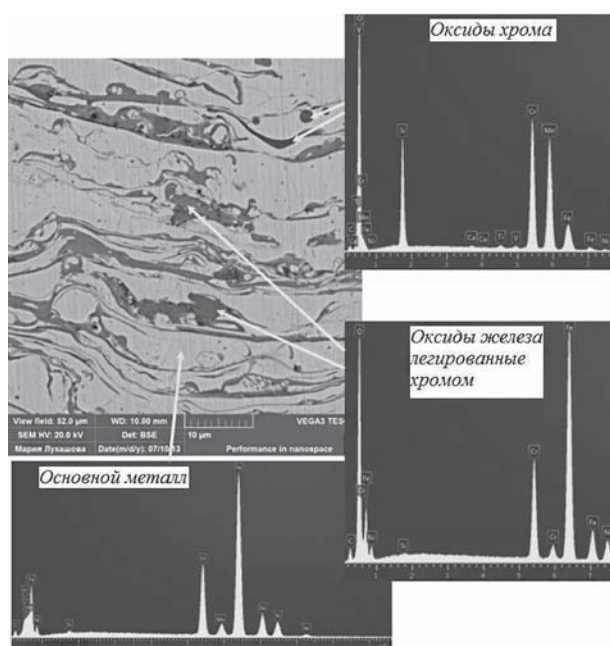


Рисунок 3 – Микроанализ локального участка газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т, содержащего оксиды хрома

к номинальному, диффузия азота протекает на существенно меньшую глубину ≈18 мкм (см. рисунок 2 б). Обнаруженное различие в глубине диффузионного переноса азота в рассматриваемых участках покрытия может быть связано с неодинаковым содержанием в них хрома. Действительно, по данным [11], увеличение содержания хрома в азотируемых сплавах на железной основе существенно понижает в них химический потенциал азота и уменьшает его диффузионную подвижность. В связи с этим представляло интерес провести расчет эффективных коэффициентов диффузии азота в частицах газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т с различным содержанием хрома. При этом нами использованы экспериментальные данные по профилю и концентрации азота, приведенные на рисунке 2.

Для оценки эффективного (т. е. кажущегося) коэффициента диффузии азота на основании экспериментальных данных (см. рисунок 2) использован метод Матано [12]. Сущность метода заклю-

чается в решении уравнения Фика  $\left(\frac{dc}{dt} = \frac{d}{dx} \left( D \frac{dc}{dx} \right)\right)$

с использованием подстановки Больцмана  $\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}}$ ,

где  $x$  — расстояние;  $t$  — время диффузии;  $D$  — коэффициент диффузии;  $c$  — концентрация диффузанта.

После подстановки получаем обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$-\frac{\lambda}{2} \frac{dc}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left( D \frac{dc}{d\lambda} \right). \quad (1)$$

При заданных граничных условиях ( $c = c_0$  при  $\lambda = -\infty$ ,  $c = 0$  при  $\lambda = \infty$ ) выражение 1 принимает вид [12]:

$$D = -\frac{1}{2} \frac{d\lambda}{dc} \int_0^c \lambda dc. \quad (2)$$

Для фиксированного момента времени  $t = \text{const}$  выражение 2 можно записать:

$$D = -\frac{1}{2t} \frac{dx}{dc} \int_0^c x dc, \quad (3)$$

где  $\frac{dx}{dc}$  — котангенс угла наклона касательной к кривой

концентрации в точке с координатой  $x$ ;  $\int_0^c x dc$  — площадь под концентрационной кривой (количество продиффундировавшей примеси — в данном случае азота).

Расчетные значения коэффициента диффузии азота ( $D$ ) по глубине частиц покрытия с различным содержанием хрома (≈11–12 масс.% и ≈18–19 масс.%) представлены на рисунке 4. Можно видеть, что в частицах напыленного слоя с пониженной концентрацией хрома коэффициент диффузии азота значительно выше, чем в частице с высоким содержанием хрома (см. рисунок 4). В частности, коэффициент



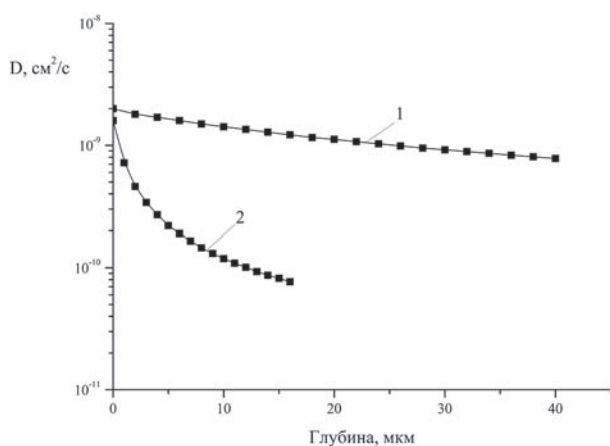


Рисунок 4 — Изменение коэффициента диффузии атомов азота по глубине частиц газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т с различным содержанием хрома: 1 — при содержании хрома  $\approx 11-12$  масс.%; 2 — при содержании хрома  $\approx 18-19$  масс.%

диффузии азота в частицах покрытия с содержанием хрома  $\approx 11-12$  масс.% составляет  $D = 8 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с, а в частице с содержанием хрома  $\approx 18-19$  масс.% —  $D = 7,5 \cdot 10^{-11} - 1,5 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с (см. рисунок 4). Из рисунка также видно, что по мере удаления от поверхности эффективный коэффициент диффузии азота уменьшается в 2,5 раза для частиц с пониженной концентрацией хрома и более чем на порядок (в 20 раз) в областях с высоким содержанием хрома.

Таким образом, повышенное содержание хрома в частицах газотермического покрытия будет приводить к снижению в них коэффициента диффузии азота, и, следовательно, к уменьшению глубины азотированного слоя (см. рисунок 2 б). В то же время в частицах с пониженным относительно номинального содержания хрома диффузия азота будет идти быстрее (см. рисунок 4) и глубина азотированного слоя при этом существенно возрастает (см. рисунок 2 а).

Обнаруженные особенности диффузионного переноса атомов азота в процессе ионного азотирования газотермических покрытий из высокохромистых сталей могут существенно влиять на их структуру, фазовый состав и физико-механические характеристики. Указанные закономерности могут быть использованы для управления свойствами напыленных покрытий, модифицированных примесями атомов внедрения.

Необходимо отметить, что рассчитанные в работе коэффициенты диффузии азота для случая ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из аустенитной стали 06Х19Н9Т при 870 К значительно превышают значения коэффициента диффузии азота для случая газового азотирования аустенитной стали при аналогичной температуре ( $D = 6,9 \cdot 10^{-11}$  см<sup>2</sup>/с [13]). Различие коэффициентов диффузии указывает на более высокую скорость насыщения аустенитной стали азотом в случае ионно-лучевого азотирования. Ускорение диффузионного переноса азота в процессе ионно-лучевой обработки

достигается за счет одновременного действия большого числа физических факторов, среди которых, по нашему мнению, важную роль играет генерирование при облучении материала большого количества точечных дефектов в поверхностном слое [14, 15]. В частности, в тонких поверхностных слоях покрытия ( $\sim 10$  нм) при ионно-лучевой обработке генерируется повышенное количество неравновесных вакансий:  $C_v \approx 10^{19} - 10^{21}$  см<sup>-3</sup> [14]. Это соответствует атомной концентрации  $c_v = 0,01 - 1,2$  %, что на 6–8 порядков превышает равновесную концентрацию вакансий ( $c_v^0 \sim 10^{-8}$  %) при температуре 870 К. Имеющиеся в поверхностном слое неравновесные вакансии диффундируют как к внешней поверхности, на которой они исчезают (процесс, обратный формированию вакансий по Шоттки), так и вглубь материала. При диффузии вакансий в объеме металла они рекомбинируют с возникшими при облучении межузельными атомами железа и осаждаются (т. е. исчезают) на краевых дислокациях, поэтому, по мере удаления от поверхностного слоя, их концентрация будет быстро убывать, стремясь к равновесной. Также в области высокой концентрации неравновесных вакансий атомы азота могут совершать диффузионные скачки из междоузлия в соседнюю с ним вакансию, а далее в следующее междоузлие. Все это может существенно ускорить диффузионное перемещение атомов азота. Наличие потоков вакансий неизбежно вызывает встречные потоки атомов замещения в сплаве (Cr, Ni и пр.) — так называемый обратный эффект Киркендалла [16, 17], что приводит к градиенту концентрации этих атомов в поверхностном слое. С другой стороны, повышению концентрации атомов хрома в азотированных слоях покрытия также будет способствовать диффузия атомов этого элемента из нижележащих слоев покрытия, обусловленная выделением нитрида хрома в азотированном слое [18]. Поскольку хром понижает химический потенциал азота, то возникновение градиента концентрации хрома неизбежно вызовет встречную диффузию азота. Из вышеизложенного также следует, что эффективный коэффициент диффузии азота должен уменьшаться с удалением от внешней поверхности.

**Заключение.** Изучено распределение атомов азота и хрома в поверхностных слоях газотермического покрытия из стали 06Х19Н9Т после ионно-лучевого азотирования при 870 К. Показано, что различные частицы газотермического покрытия содержат разную концентрацию хрома. Различия в содержании хрома в напыленных частицах обусловлено ускоренным окислением мелких частиц, характеризующихся повышенной удельной площадью поверхности по сравнению с крупными частицами.

Обнаружено, что в частицах с повышенным содержанием хрома в результате ионно-лучевого азотирования регистрируется пониженная глубина азотированного слоя и повышенная

концентрация легирующей примеси по сравнению с частицами с более низким содержанием атомов хрома. Рассчитаны значения коэффициентов диффузии азота по глубине напыленных частиц с различным содержанием хрома. Установлено, что высокое содержание хрома в напыленных частицах приводит к понижению коэффициента диффузии атомов азота.

Показано, что коэффициент диффузии азота в газотермическом покрытии из стали 06X19N9T при ионно-лучевом азотировании значительно превышает коэффициент диффузии азота в стали для случая газового азотирования. Сделано заключение, что ускоренный диффузионный перенос атомов азота при ионно-лучевом азотировании обусловлен генерированием большого числа неравновесных дефектов в процессе ионной обработки.

#### Список литературы

1. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь. [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 452 с.
2. Григорчик, А.Н. Структура и триботехнические характеристики модифицированного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А.Н. Григорчик, А.В. Белый // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. — Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2013. — Ч. 2. — С. 479–481.
3. Белый, А.В. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А.В. Белый, В.А. Кукареко, А. Патеюк. — Минск: Беларус. наука, 2007. — 244 с.
4. Формирование и свойства наноструктурных поверхностных слоев в аустенитных сталях подвергнутых ионно-лучевому азотированию / А.В. Белый [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2006. — № 7. — С. 100–106.
5. Kukareko, V.A. Dose rate and microstructure of nitrogen ion-implanted chromium steels / V.A. Kukareko, A.V. Byeli // Surface and Coatings Technology. — 2000. — Vol. 127, № 2–3. — Pp. 174–178.
6. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства обработанного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А.Н. Григорчик [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2014. — № 2. — С. 26–30.
7. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / В.А. Кукареко [и др.] // Трение и износ. — 2013. — № 6(34). — С. 621–627.
8. Структурно-фазовое состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / А.Н. Григорчик [и др.] // Трение и износ. — 2015. — № 6(36). — С. 661–670.
9. Особенности диффузионного переноса легирующей примеси при ионно-лучевом азотировании газотермических покрытий / А.Н. Григорчик [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 1(34). — С. 75–80.
10. Гольдшмидт, Х.Дж. Сплавы внедрения / Х.Дж. Гольдшмидт; под ред. Н.Т. Чеботарева. — М.: Мир, 1971. — Т. 2. — 464 с.
11. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин [и др.]. — М.: Металлургия, 1991. — 320 с.
12. Зайт, В. Диффузия в металлах / В. Зайт; пер. с нем. Г.С. Куликова, Р.Ш. Малкович; под ред. Б.И. Болтакса. — М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1958. — 381 с.
13. Фромм, Е. Газы и углерод в металлах / Е. Фромм, Е. Гебхард. — М.: Металлургия, 1980. — 712 с.
14. Григорчик, А.Н. Расчет глубины модифицированных ионами азота слоев в стали 06X19N9T с учетом генерируемых в процессе ионного азотирования точечных дефектов / А.М. Григорчик // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 1(34). — С. 87–91.
15. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах / А.Н. Диденко [и др.]. — Томск: Изд-во НТЛ, 2004. — 328 с.
16. Potter D. I. In Proc.: Phase Transformation during irradiation. / Ed. By F.V. Nolf - N.Y., London: Appl. Sci. Publ., 1983. — Pp. 213–245.
17. Khina, B.B. Modelling accelerated solid-state diffusion under the action of intensive plastic deformation / B.B. Khina, I. Solpan, G.F. Lovshenko // Journal of Materials Science. — 2004. — Vol. 39, №. 16–17. — Pp. 5135–5138.
18. Особенности диффузионного переноса атомов хрома при ионно-лучевом азотировании газотермического покрытия из аустенитной стали с высоким содержанием хрома / А.В. Белый [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2015. — № 8 — С. 61–67.

**GRIGORCHIK Aleksandr N.**

Post-Graduate Student<sup>1</sup>

**KUKAREKO Vladimir A., Dr. Phys.-Math. Sc., Associate Professor**

Head of the Center of Structural Research and Tribo-Mechanical Test of Materials and Machine-Building Output<sup>1</sup>

E-mail: v\_kukareko@mail.ru

**BYELI Aleksey V., Dr. Techn. Sc., Corresponding Member**

Associate Director<sup>2</sup>

**BELOTSEKOVSKY Marat A., Dr. Techn. Sc., Associate Professor**

Head of the Laboratory of Thermal Spray Methods of Machines units Management<sup>1</sup>

**KHINA Boris B., Dr. Phys.-Math. Sc., Associate Professor**

Chief Researcher<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 13 April 2016.

## THE REGULARITIES OF NITROGEN DIFFUSION DURING THE ION-BEAM NITRIDING PROCESS OF AUSTENITIC THERMAL-SPRAYED COATING

*The distribution of nitrogen and chromium atoms in near-surface layers of austenitic thermal sprayed coating subjected to ion-beam nitriding at 870 K has been studied. It is established that the sprayed particles of the coating possess various chromium content. It is shown that, as a result of ion-beam nitriding, the nitrided layers have a higher depth in particles with a lower chromium concentration. The estimation of diffusion coefficient of nitrogen in the sprayed particles with different chromium content has been performed. It is shown that the diffusion coefficient of nitrogen during ion-beam treatment significantly exceeds the values observed during the process of traditional gas-phase nitriding. It is established that the diffusion coefficient of nitrogen tends to decrease with increasing chromium content in the sprayed particles of the coating and decreases with distance from the outer surface.*

**Keywords:** thermal sprayed coating, ion-beam nitriding, chromium concentration, diffusion coefficient

### References

- Vityaz P.A., Ivashko V.S., Ilyuschenko A.F. [et al.]. *Teoriya i praktika nanoseniya zashhitnykh pokrytiyu* [Theory and practice of application of protective covering]. Minsk: Belarus. navuka, 1998. 583 p.
- Grigorchik A.N., Byeli A.V. Struktura i tribotekhnicheskie harakteristiki modifitsirovannogo ionami azota gazotermicheskogo pokrytiya iz stali 40H13 [Structurally-phased state and tribotechnical characteristics of 40H13 nitrogen ion modified steel gas-thermal coating] *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya* [Topical questions of machine science]. Minsk, OIM NAN Belarusi, 2013, vol. 2, pp. 479–481.
- Byeli A.V., Kukareko V.A., Pateyuk A. *Inzheneriya poverhnostej konstruktsionnykh materialov koncentrirovannymi potokami ionov azota* [Construction materials surfaces engineering with concentrated flows of nitrogen ions]. Minsk, Belorusskaya navuka, 2007. 244 p.
- Byeli A.V., Kukareko V.A., Taran I.I. [et al.]. Formirovanie i svoystva nanostrukturnykh poverhnostnykh sloev v austenitnykh stalyah podvergnutykh ionno-luchevomu azotirovaniyu [Formation and characteristics of nanostructured surface layers of austenitic steels exposed to ion-beam nitriding]. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron research], 2006, vol.7, pp. 100–106.
- Kukareko V.A., Byeli A.V. Dose rate and microstructure of nitrogen ion-implanted chromium steels. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 127, no. 2–3, pp. 174–178.
- Grigorchik A.N., Kukareko V.A., Belotserkovskii M.A. [et al.]. Strukturno-fazovoe sostojanie i tribotekhnicheskie svoystva obrabotannogo ionami azota gazotermicheskogo pokrytiya iz stali 40H13 [Structurally-phased state and tribotechnical characteristics of 40H13 nitrogen ion modified steel gas-thermal coating]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2014, no. 2, pp. 26–30.
- Kukareko V.A., Byeli A.V., Belotserkovskii M.A. [et al.]. Vliyanie ionno-luchevogo azotirovaniya na strukturno-fazovoe sostojanie i tribotekhnicheskie svoystva ekonomichnykh gazotermicheskikh pokrytiy iz provolochnykh staley razlichnykh klassov [Effect of ion-beam nitriding on the structure-phase state and tribological characteristics of economical thermal coatings of steel wire of various classes]. *Trenie i iznos* [Friction and deterioration], 2013, no. 6(34), pp. 621–627.
- Grigorchik A.N., Kukareko V.A., Byeli A.V. [et al.]. Strukturno-fazovoe sostojanie i iznosostoykost' v usloviyah granichnogo treniya obrabotannykh ionami azota gazotermicheskikh pokrytiy iz staley razlichnykh klassov [The structural-phase state and resistance to wear under boundary lubrication treated with nitrogen ions thermal coatings of steels of various classes]. *Trenie i iznos* [Friction and deterioration], 2015, no. 6(36), pp. 661–670.
- Grigorchik A.N., Kukareko V.A., Byeli A.V. [et al.]. Osobennosti diffuzionnogo perenosa legiruyushchey primesi pri ionno-luchevom azotirovani gazotermicheskikh pokrytiy [Features of diffusive transport of the dopant in ion-beam nitriding thermal coatings]. *Mehanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, tools and materials], 2016, no. 1(34), pp. 75–80.
- Goldshmidt H.Dzh., Chebotarev N.T. *Splavy vnedreniya* [Interstitial alloy]. Moscow, izd-vo Mir, 1971, vol. 2. 464 p.
- Lahtin Ju.M., Kogan Ja.D., Shpis G.-I. [et al.]. *Teoriya i tehnologiya azotirovaniya* [Theory and nitriding technology]. Moscow, Metallurgiya. 1991, 321 p.
- Zayt V., Kulikova G.S., Malkovich R.Sh., Boltaks B.I. *Diffuziya v metallah* [Diffusion in metals]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1958. 381 p.
- Fromm E., Gebhard E. *Gazy i uglerod v metallah* [Gases and carbon in metals]. Moscow, Metallurgiya, 1980. 712 p.
- Grigorchik A.N. Raschet glubiny modifitsirovannykh ionami azota sloev v stali 06H19N9T s uchedom generiruemyykh v processe ionnogo azotirovaniya tochechnykh defektov [Calculation of the depth in 06H19N9T modified steel layers based on generated in the ion defects]. *Mehanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, tools and materials], 2016, no. 1(34), pp. 87–91.
- Didenko A.N., Sharkeev Ju.P., Kozlov Je.V. [et al.]. *Effekty dal'nodeystviya v ionno-implantirovannykh metallicheskikh materialah* [The long-range effects in ion-implanted metallic materials]. Tomsk, Izd-vo NTL, 2004. 328 p.
- Potter D.I., Nolf F.V. *In Proc: Phase Transformation during irradiation*. London, Appl. Sci. Publ., 1983, pp. 213–245.
- Khina B.B., Solpan I., Lovshenko G.F. Modelling accelerated solid-state diffusion under the action of intensive plastic deformation. *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 16–17, pp. 5135–5138.
- Byeli A.V., Belotserkovskii M.A., Grigorchik A.N. [et al.]. Osobennosti diffuzionnogo perenosa atomov hroma pri ionno-luchevom azotirovani gazotermicheskogo pokrytiya iz austenitnoj stali s vysokim soderzhanie hroma [Characteristics of diffusive transport of chromium atoms in an ion-beam nitriding gas thermal coating of austenitic steel with high chromium content]. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron research], 2015, no. 8, pp. 61–67.