

**ФАЗОВЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ,  
СФОРМИРОВАННЫХ В АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНОЙ  
МИКРОСТРУКТУРОЙ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ**

Е.А. Загибалова<sup>1</sup>, В.А. Москвина<sup>2</sup>

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова<sup>2</sup>, аспирант В.А. Москвина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: [zagibalova-lena99@mail.ru](mailto:zagibalova-lena99@mail.ru)

**PHASE AND ELEMENTAL COMPOSITIONS OF COMPOSITE SURFACE LAYERS  
PRODUCED BY ION-PLASMA TREATMENT IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL WITH  
VARIOUS MICROSTRUCTURES**

E.A. Zagibalova<sup>1</sup>, V.A. Moskвина<sup>2</sup>

Scientific Supervisors: Doctor of Sciences E.G. Astafurova<sup>2</sup>, PhD student V.A. Moskвина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, Akademicheskyy pr. 2/4, 634055

E-mail: [zagibalova-lena99@mail.ru](mailto:zagibalova-lena99@mail.ru)

***Abstract.** In given work, we studied the phase and elemental compositions of the surface layers in stable austenitic stainless steel treated by ion-plasma hardening in a mixture of gases  $N_2+C_2H_2+Ar$ . The effect of a deformation-induced microstructure, which was formed before ion-plasma treatment, on the characteristics of the hardened layers in the steel specimens was experimentally studied.*

**Введение.** Широкий спектр применения аустенитных нержавеющей сталей (АНС) обусловлен рядом их физических свойств (высокая пластичность, коррозионная стойкость, формуемость). Ионно-плазменное насыщение сталей атомами внедрения позволяет модифицировать структуру и фазовый состав поверхностного слоя этих сталей [1]. Этот процесс приводит к улучшению физико-механических свойств, и, следовательно, к повышению эксплуатационных свойств АНС. Условия обработки (продолжительность процесса, давление в рабочей камере, состав газа, температура) напрямую влияют на получаемые свойства поверхности упрочняемого материала. Весомый вклад в формируемые свойства поверхности материала вносит предварительная термомеханическая обработка обрабатываемого материала, проводимая перед ионно-плазменным упрочнением. Микроструктурные характеристики (размер зерна, плотность дефектов и границ зерен, фазовый состав и т.д.) определяют механические свойства АНС до поверхностной обработки, а также существенно влияют на свойства формируемых при ионно-плазменном насыщении упрочненных поверхностных слоев.

Цель работы исследовать фазовый и элементный состав композиционных слоев, сформированных в АНС 01X17H13M3 с различными исходными структурами при ионно-плазменном упрочнении в смеси газов аргона, азота и ацетилен.

**Материалы и методы исследования.** Для исследования была выбрана стабильная АНС 01X17H13M3 (Fe-16,8Cr-13,3Ni-2,7Mo-1,7Mn-0,6Si-0,01C масс.%). Две партии закаленных заготовок стали подвергали плоской прокатке при комнатной температуре до степеней осадки  $\varepsilon \approx 80\%$  (режим 1) и  $\varepsilon \approx 40\%$  (режим 2). Образцы, соответствующие режиму 1 (P1), были исследованы в прокатанном состоянии. Прокатанные по режиму 2 (P2) образцы отжигали в среде инертного газа в течение 5 ч при температуре  $T=1050^\circ\text{C}$  и охлаждали в воду. Далее P1 и P2 образцы были подвергнуты ионно-плазменной обработке (ИПО) при температуре  $T=540^\circ\text{C}$  в течение 12 часов в смеси газов  $\text{Ar}(70\%)+\text{N}_2(25\%)+\text{C}_2\text{H}_2(5\%)$  при давлении  $P=300$  Па. Микроструктуру образцов исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп JEM 2100), а также оптической микроскопии (микроскоп Altam1 MET 1C). Рентгеновские исследования образцов были проведены на дифрактометре ДРОН-7. Методом дифракции обратно рассеянных электронов (ДОЭ) проводили исследование исходных структур образцов (микроскоп Quanta 600 FEG). Измерение профилей распределения N и C по глубине проводили на оже-спектрометре Шхуна-2 в направлении от упрочненной ИПО-поверхности к середине образцов.

**Экспериментальные результаты.** Прокатанные P1-образцы обладали неравновесной разориентированной зеренно-субзеренной структурой ( $D=330 \pm 190$  нм). Структура P1-образцов характеризовалась высокой плотностью дефектов кристаллического строения: высокоугловые и малоугловые границы, субграницы, двойники, дислокации, полосы локализованной деформации. P2-образцы обладали крупнозернистой аустенитной структурой ( $d=54,7 \pm 31,2$  мкм). Анализ карт ДОЭ P1-образцов показал, что хорошо идентифицируются только довольно крупные участки аустенитной фазы, соответствующие отдельным субзернам. Установлено, что P1-образцы имеют в основном непрерывные малоугловые разориентации между элементами структуры. Анализ данных ДОЭ P2-образцов выявил крупнокристаллическую структуру с большим количеством двойниковых границ в теле зерен, при этом подавляющее большинство границ зерен в структуре имеют большеугловые разориентировки.

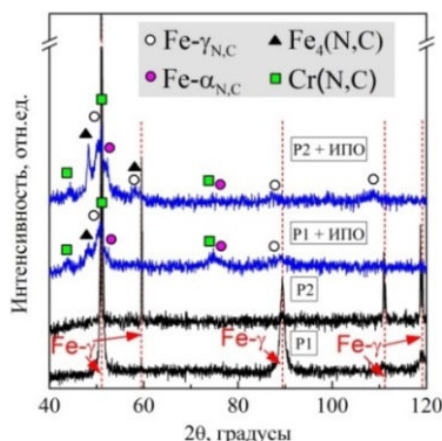


Рис. 1. Рентгенограммы для АНС 01X17H13M3 после термомеханических обработок по режимам 1 и 2 и ионно-плазменной обработки

В результате ИПО P1 и P2 образцов образуется упрочненный композиционный слой толщиной  $\approx 18-25$  мкм. Режим предварительной термомеханической обработки не влияет на фазовый состав стали, исходные образцы имеют аустенитную структуру ( $a=0,3596 \pm 0,0002$  нм). На основе анализа рентгенограмм P1 и P2 образцов после ИПО, представленных на рисунке 1, было выявлено формирование

новых фаз в поверхностном слое – легированного азотом и углеродом аустенита и феррита, нитридов и карбонитридов различного состава  $Cr(N,C)$ ,  $Fe_4(N,C)$ . То есть при ИПО происходит образование гетерофазного композиционного слоя на поверхности образцов. В процессе ИПО происходит изменение параметра решетки аустенита, что вызывает снижение интенсивности, уширение и смещение пиков легированного атомами азота и углерода аустенита по сравнению с исходными положениями пиков. Для P1-образцов наблюдали отражения от  $Cr(N,C)$  ( $a=0,4111-0,4181$  нм). Они менее интенсивны для крупнозернистых P2-образцов, при этом для этих образцов характерны более интенсивные линии  $Fe_4(N,C)$  ( $a=0,3774-0,3788$  нм). Образование феррита и фазы  $Cr(N,C)$ , как правило, зависит от температуры ИПО, ее повышение более  $450^\circ C$  приводит к частичному распаду пересыщенного азотом и углеродом аустенита. Присутствие высокой плотности дефектов и границ зерен в структуре P-1 образцов способствует этому эффекту из-за облегчения зародышеобразования нитридов хрома на дефектах кристаллического строения, сформированных во время предварительной деформации.

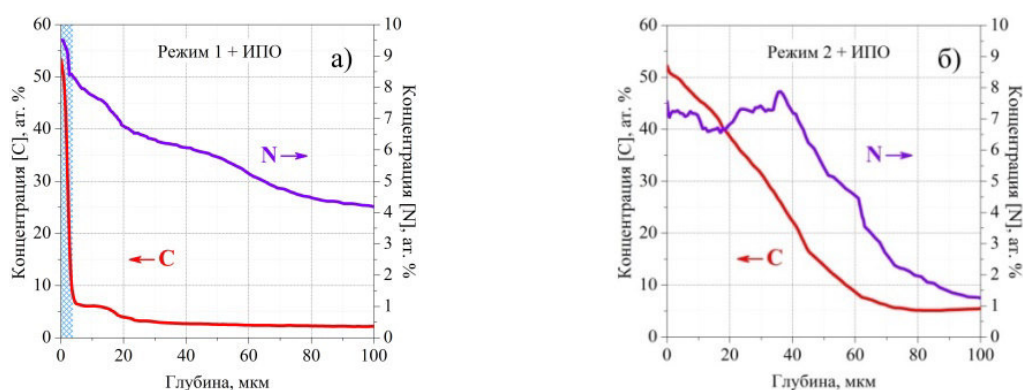


Рис. 2. Профили распределения C и N по глубине ИПО образцов АНС

На рисунке 2 представлены профили распределения C и N по глубине композиционных слоев для P1 и P2 образцов после ИПО. Профили имеют нелинейный характер, и их форма зависит от предварительной обработки образца до ИПО. Диффузия N и C в зеренно-субзеренной структуре происходит преимущественно по многочисленным (суб)границам и дефектам кристаллического строения. Они являются «ловушками» для атомов C и N преимущественными местами для образования дисперсных нитридов и карбонитридов. В свою очередь, для крупнозернистой структуры, в связи с меньшей плотностью и протяженностью зеренных границ, диффузия происходит преимущественно по телу зерна. При этом происходит образование твердого раствора азота и углерода в аустените, а затем из пересыщенного твердого раствора выделяется карбонитрид  $Fe_4(N,C)$ .

**Заключение.** Поверхностное упрочнение, изменение фазового и элементного состава в поверхностном слое образцов АНС зеренно-субзеренной и крупнозернистой структурой достигается с помощью ионно-плазменной обработки. Фазовый состав упрочненного слоя зависит от предшествующей ИПО обработки стали: в образцах с зеренно-субзеренной структурой преобладают фазы  $Fe-\gamma_{N,C}$  и  $Cr(N,C)$ , а в крупнозернистых образцах –  $Fe-\gamma_{N,C}$  и  $Fe_4(N,C)$ .

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента РФ (СП-14.2019.1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Casteletti, L.C., Neto A.L., Totten, G.E. Nitriding of stainless steels // *Metallography, Microstructure and Analysis*. – 2014. № 3. – P. 477–508.