

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И  
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ 40ХНЮ\***

Г.У. Ерболатова<sup>1</sup>, Е.Л. Никоненко<sup>2,3</sup>, Н.А. Попова<sup>2</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.К. Скаков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский Государственный технический университет им. Д.Серикбаева,

Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19, 070010

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,

Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

<sup>4</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/1, 634021

<sup>5</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов, Казахстан,

ул. Красноармейская, 2, 071100

E-mail: [natalya-popova-44@mail.ru](mailto:natalya-popova-44@mail.ru)

**THE STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATIONS IN 0.4C-1CR-1NI-1AL ALLOY AFTER  
THERMOCHEMICAL PLASMA TREATMENT**

G.U. Erbolatova<sup>1</sup>, E.L. Nikonenko<sup>2,3</sup>, N.A. Popova<sup>2</sup>

Scientific Supervisor: Prof. Dr. M.K. Skakov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk,

Serikbaev Street, 69, 070004

<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Solyanaya Square, 2, 634003

<sup>3</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 3, 0634050,

<sup>4</sup>National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan, Kurchatov,

Krasnoarmeiskaya Street, 071100

E-mail: [natalya-popova-44@mail.ru](mailto:natalya-popova-44@mail.ru)

**Abstract.** *The paper presents the transmission electron microscope investigations of the structure and phase composition of 0.4C-1Cr-1Ni-1Al alloy modified by plasma electrolyte carbonitriding. It is shown that this process leads to substantial changes in the alloy structure. Thus, changes are observed in the alloy phase composition, a set of presenting phases and their morphology, the type of the dislocation structure, and scalar density of dislocation.*

**Введение.** Одним из способов химико-термической обработки является электролитно-плазменная обработка (ЭПО). Сущность метода ЭПО заключается в нагреве обрабатываемой детали (катода) в водных растворах (электролитах). Упрочнение осуществляется путем периодического нагрева и охлаждения поверхности упрочняемого образца за счет электрического потенциала в слое плазмы, создаваемого между жидким электродом (электролитом) и поверхностью катода (образцом).

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-48-700198

В зависимости от состава электролита ЭПО может представлять цементацию (насыщение поверхности обрабатываемых деталей углеродом с последующим изменением фазового состава и структуры материала), азотирование (насыщение поверхностных слоев изделий в плазме, содержащей азот при пониженном давлении, которая возбуждена электрическим разрядом) и нитроцементацию (поверхностное насыщение стали одновременно углеродом и азотом). Изменяя состав электролита, можно проводить цементацию, азотирование и нитроцементацию с большими скоростями (10-100 мкм/мин), значительно превышающими характерные скорости соответствующих классических процессов.

**Целью настоящей работы** является исследование закономерностей изменения структуры и фазового состава сплава 40ХНЮ под действием электролитно-плазменной нитроцементации.

**Материал и методы исследования.** Объектом исследования являлся сплав аустенитного класса 40ХНЮ. Исследования проведено методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа выбиралось равным от 8000 до 50000 крат. Изучение образцов проводилось в двух состояниях: 1) до модификации (исходное состояние) и 2) после нитроцементации в приповерхностной зоне образца. Электролитно-плазменная нитроцементация проводилась в водном растворе в течение 5 минут при температуре 700<sup>0</sup>С.

**Полученные результаты.** Было установлено, что в *исходном состоянии* матрицей сплава является неупорядоченная ГЦК фаза  $Al_{0,7}Cr_{0,3}Ni_3$ . Присутствует эта фаза в виде зерен, резко различных по размеру: вдоль границ крупных зерен, составляющих основу материала, располагаются мелкие зерна. Внутри крупных зерен фазы  $Al_{0,7}Cr_{0,3}Ni_3$  часто присутствуют выделения других фаз: 1) выделения ОЦК фазы NiAl; 2) выделения ГЦК фазы  $AlCrNi_2$ ; 3) выделения двух фаз NiAl и  $AlCrNi_2$ .

Фаза NiAl присутствует только внутри зерен  $Al_{0,7}Cr_{0,3}Ni_3$  в виде параллельных пластин правильной формы и практически одинаковой ширины в пределах одного зерна.

Фаза  $AlCrNi_2$  присутствует в различных вариантах: 1) внутри зерен  $Al_{0,7}Cr_{0,3}Ni_3$  вместе с пластинчатыми выделениями NiAl; 2) в виде зерен внутри матричных зерен  $Al_{0,7}Cr_{0,3}Ni_3$ ; 3) в виде отдельно расположенных однофазных зерен. Нередко на границах таких зерен находятся частицы карбида  $Cr_{23}C_6$ . Иногда зерна фазы  $AlCrNi_2$  располагаются группами.

Изображение структуры сплава 40ХНЮ в исходном состоянии приведено на рис. 1.

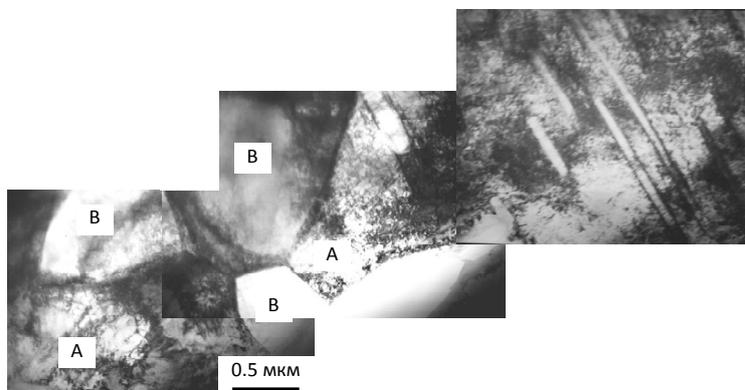


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение участка структуры, содержащий зерна различных фаз: А – зерна фазы  $Al_{0,7}Cr_{0,3}Ni_3$ , В – зерна фазы  $AlCrNi_2$ . Исходное состояние сплава 40ХНЮ

В исходном состоянии в разных зернах  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$  была сформирована дислокационная субструктура разных типов: в двухфазных зернах с пластинчатыми выделениями фазы NiAl – хаотическая и сетчатая субструктура; в однофазных и двухфазных с зернами фазы AlCrNi<sub>2</sub> – ячеисто-сетчатая; в трехфазных зернах – фрагментированная. В зернах фазы AlCrNi<sub>2</sub> дислокации образуют дислокационные сетки. Величина скалярной плотности дислокаций в зернах всех фаз имеет практически равное значение ( $\sim 3,0 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ).

Электролитно-плазменная нитроцементация сплава 40ХНЮ не привела к кардинальным изменениям в структуре – по-прежнему сплав 40ХНЮ остается многофазной смесью, состоящей из крупных и мелких зерен. По-прежнему в сплаве присутствуют фазы  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$ , AlCrNi<sub>2</sub> и NiAl. Тем не менее, изменения в структуре все же произошли и довольно существенные: изменился фазовый состав и список присутствующих фаз, а также их морфология. Было установлено, что твердые растворы  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$  и AlCrNi<sub>2</sub> отличаются неоднородностью по концентрации. Об этом свидетельствуют нарушения дифракционных картин, полученных с соответствующих участков структуры. Во-первых, вблизи основных рефлексов фаз  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$  и AlCrNi<sub>2</sub> на микродифракционных картинах появляются сателлиты, что свидетельствует о микрорасслоении твердого раствора. Помимо микрорасслоения твердого раствора присутствует мезорасслоение, где волны неоднородности структуры простираются на расстояния порядка нескольких микрометров. Поэтому в одних участках образца сателлиты присутствуют, в других – нет. Во-вторых, у основных рефлексов фаз  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$  и AlCrNi<sub>2</sub> на микродифракционных картинах, обнаруживаются тяжи, что также свидетельствует о неоднородности твердых растворов. В-третьих, характерный контраст на изображении типа «соль-перец», который переходит в контраст наноразмерной фазы Cr<sub>2</sub>N. Изображение структуры приповерхностной зоны сплава 40ХНЮ после электролитно-плазменной нитроцементации приведено на рис.2.

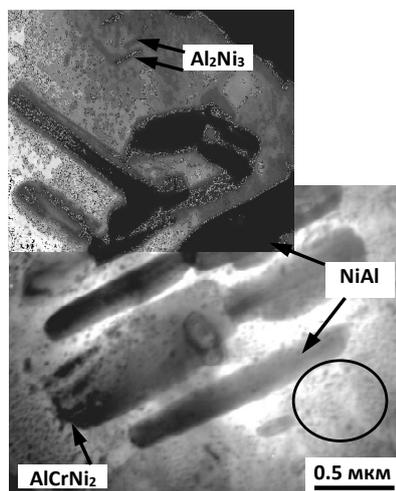


Рис.2. Изображение сплава 40ХНЮ после электролитно-плазменной нитроцементации. Приповерхностная зона образца (окружностью отмечена группа частиц Cr<sub>2</sub>N)

Электролитно-плазменная нитроцементация привела к тому, что в приповерхностной зоне образца во всех зернах фазы  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$  присутствуют только хаотически распределенные дислокации. Величина скалярной плотности во всех зернах практически одинакова и существенно меньше по сравнению с исходным состоянием материала ( $\sim 1,0 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ). В зернах фазы AlCrNi<sub>2</sub> тип дислокационной субструктуры не изменился, а её величина незначительно уменьшилась ( $2,3 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ).

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что электролитно-плазменная нитроцементация сплава 40ХНЮ привела к изменению: 1) фазового состава и списка присутствующих фаз – произошло выделение нитрида хрома Cr<sub>2</sub>N; 2) морфологии фаз; 3) формированию однотипной дислокационной субструктуры в зернах фазы  $Al_{0.7}Cr_{0.3}Ni_3$  и к уменьшению в них скалярной плотности дислокаций практически в 3 раза, при этом в зернах фазы AlCrNi<sub>2</sub> не изменился ни тип дислокационной субструктуры, ни величина скалярной плотности дислокаций.