

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ  
ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ**

Л.А. Ерыгина<sup>1</sup>, Н.А. Попова<sup>2</sup>, Е.Л. Никоненко<sup>2,3</sup>, М.К. Скаков<sup>1</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.К. Скаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан,  
г. Курчатов, Казахстан, ул. Красноармейская, 2, 071100

<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

E-mail: [lyuda.mila@mail.ru](mailto:lyuda.mila@mail.ru)

**PHASE COMPOSITION OF PERLITE STEEL MODIFIED BY ELECTROLYTIC PLASMA  
NITRIDING**

L.A. Erygina<sup>1</sup>, N.A. Popova<sup>2</sup>, E.L. Nikonenko<sup>2,3</sup>, M.K. Skakov<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Prof. Dr. M.K. Skakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,  
Kurchatov, Kazakhstan, Krasnoarmeiskaya str., 2, 071100

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

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

E-mail: [lyuda.mila@mail.ru](mailto:lyuda.mila@mail.ru)

**Abstract.** *The paper presents the transmission electron microscopy investigations of the phase composition of the type 34X1M steel modified by electrolytic plasma nitriding. It is shown that nitriding results in significant modifications of the steel structure, namely the phase composition and observed phases, including their morphology.*

**Введение.** Наряду с традиционными методами химико-термической обработки применяются новые методы улучшения эксплуатационных свойств материалов. Одним из таких методов является электролитно-плазменная обработка. Воздействие электролитической плазмой, при котором происходит насыщение поверхности различными химическими элементами, сопровождается формированием поверхности со специфической морфологией. Изменяя состав электролита, можно проводить обработку поверхности с большими скоростями, значительно превышающими характерные скорости термических газофазных и электролитических процессов.

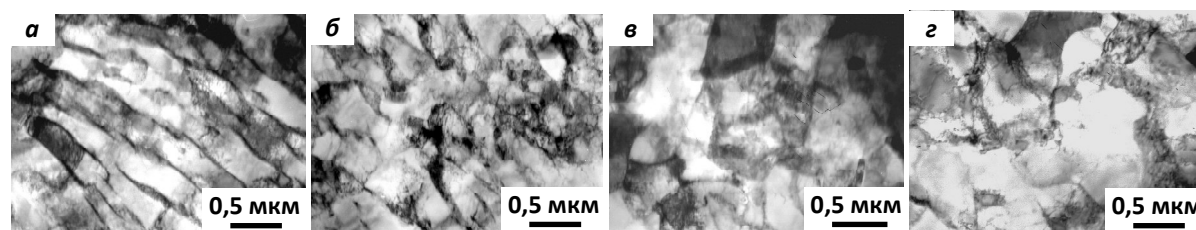
Целью настоящей работы является исследование закономерностей изменения структуры и фазового состава стали 34XН1М под действием электролитно-плазменного азотирования.

**Материал и методы исследования.** Объектом исследования являлась сталь 34XН1М. Химический состав исследуемой стали (0,34% С; 1,34% Cr; 0,67% Mn; 0,36% Si; 1,62% Ni; 0,24% Mo; 0,028% P; 0,033% S; остальное Fe) соответствовал ТУ 24-1-12-179-75.

Исследовалось структурное состояние материала методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Изучение образцов проводилось в двух состояниях: 1) до модификации (исходное состояние) и 2) после азотирования. Электролитно-плазменная обработка проводилась азотированием в азотосодержащем водном растворе в течение 5 минут при температуре 600 °С. Исследования выполнены на тонких фольгах с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа выбиралось равным от 8000 до 50000 крат.

**Полученные результаты.** Было установлено, что в исходном состоянии структура стали представляет: пластинчатый перлит, феррито-карбидную смесь и фрагментированный феррит.

Пластинчатый перлит присутствует в виде практически идеального (рис.1а) и фрагментированного (рис.1б). Идеальный (или практически идеальный) пластинчатый перлит представляет собой чередующиеся параллельные пластины  $\alpha$ -фазы (феррита) и цементита, расположенные на кратных расстояниях друг от друга. Фрагментированный перлит (или первично фрагментированный перлит) представляет собой структуру, в которой перлитные колонии в основном сохраняются. Объемная доля перлита составляет 35% (идеального – 10%, фрагментированного – 25%).



*Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 34ХН1М в исходном состоянии: пластинчатый перлит (а), фрагментированный пластинчатый перлит (б), феррито-карбидная смесь (в), фрагментированный феррит (г)*

Феррито-карбидная смесь (рис.1в) фактически представляет собой вторично фрагментированный перлит, т.е. разрушенные перлитные колонии. Образуются изотропные фрагменты  $\alpha$ -фазы, границы которых частично окаймлены цементитом. Цементит располагается не только по границам фрагментов, но и в их стыках. Поэтому такие участки структуры материала фактически представляют собой смесь зерен  $\alpha$ -фазы и цементита и их следует называть «феррито-карбидной смесью». Объемная доля этой морфологической структуры в материале составляет ~45%.

Фрагментированный феррит представляет собой изотропные фрагменты  $\alpha$ -фазы (рис.1г). Ни по границам фрагментов, ни в их стыках цементит не обнаруживается. Тем не менее, направленность фрагментов  $\alpha$ -фазы сохраняется по типу перлитных колоний. Объемная доля этой структуры составляет в материале 20%.

Азотирование образца привело к тому, что морфология тонкой структуры представлена теперь пластинчатым нефрагментированным перлитом (45%) и фрагментированным ферритом (55%).

Детальное исследование структуры пластинчатого нефрагментированного перлита показало, что он находится после азотирования в трех состояниях. Первое состояние (15%) – практически идеальный пластинчатый перлит (рис.2а). Второе состояние (10%) – пластинчатый перлит с разрушенными

пластинами цементита (рис.2б). И третье состояние (20%) – дефектный пластинчатый перлит (рис.2в). Дифракционный анализ показал, что во всех состояниях кроме легированного цементита  $M_3C$  присутствуют частицы фазы  $Fe_3Mo_3N$ . Отличие состоит лишь в том, что в первом и втором состояниях частицы фазы  $Fe_3Mo_3N$  присутствуют в  $\alpha$ -фазе на дислокациях, образуя крапчатый контраст, а в третьем состоянии они находятся внутри пластин цементита. Частицы, расположенные на дислокациях, обладают округлой формой. Средний размер частиц в обоих состояниях одинаков и равен 12 нм. Объемная доля их в  $\alpha$ -фазе в каждой составляющей имеет величину  $\sim 1\%$ . Частицы фазы  $Fe_3Mo_3N$ , расположенные внутри пластин цементита, также обладают округлой формой, но средний размер их крупнее (25 нм). Объемная доля их внутри пластин цементита третьей составляющей нефрагментированного перлита составляет 3%.

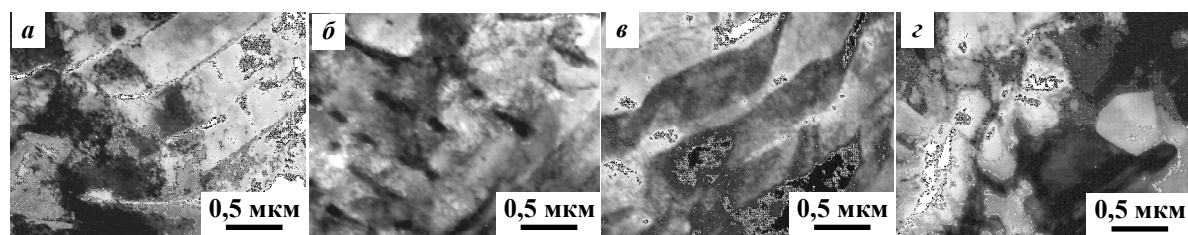


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 34XN1M после азотирования: а – практически идеальный пластинчатый перлит (первое состояние нефрагментированного перлита), б – пластинчатый перлит с разрушенными пластинами цементита (второе состояние нефрагментированного перлита), в – дефектный пластинчатый перлит (третье состояние нефрагментированного перлита), г – фрагментированный феррит

Фрагментированный феррит – это вторая составляющая структуры в азотированной стали 34XN1M (рис.2г). Как и в исходном состоянии, эта структура представляет собой изотропные фрагменты. Проведенный дифракционный анализ показал, что во фрагментированной структуре феррита присутствуют частицы трех фаз, а именно, нитрида  $Fe_3Mo_3N$ , карбонитрида  $Cr_2C_{0.61}N_{0.39}$  и легированного цементита  $M_3C$ . Частицы нитрида  $Fe_3Mo_3N$  обладают округлой формой и расположены внутри фрагментов на дислокациях, а также на границах фрагментов. Средний размер частиц  $Fe_3Mo_3N$ , находящихся как внутри, так и на границах фрагментов, составляет 20 нм, объемная доля во фрагментированном феррите также как внутри, так и на границах фрагментов, составляет 1,5%. Частицы карбонитрида  $Cr_2C_{0.61}N_{0.39}$  располагаются на границах и в стыках фрагментов, имеют неправильную форму, большей по сравнению с частицами фазы  $Fe_3Mo_3N$  размер ( $\langle d \rangle = 150$  нм). Объемная доля их во фрагментированном феррите составляет 2%.

**Заключение.** Методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии выполнено исследование фазового состава поверхностного слоя стали 34XN1M после электролитно-плазменного азотирования. Установлено, что азотирование приводит:

- 1) к изменению морфологических составляющих матрицы стали,
- 2) к новому выделению вторичных фаз: карбонитрида  $Cr_2C_{0.61}N_{0.39}$  и нитрида  $Fe_3Mo_3N$ .

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