

**ВЛИЯНИЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ,
ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ
АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 01X17H13M3 С ЗЕРЕННО-СУБЗЕРЕННОЙ
СТРУКТУРОЙ РАЗНОЙ МОРФОЛОГИИ**

В.А. МОСКВИНА^{1,2}, Е.Г. АСТАФУРОВА², К.Н. РАМАЗАНОВ³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

³Уфимский государственный авиационный технический университет

E-mail: valya_moskvina@mail.ru

**INFLUENCE OF ION NITRIDING ON STRUCTURE, STRENGTH PROPERTIES
AND FRACTURE MECHANISM OF AUSTENITIC STEEL WITH GRAIN-
SUBGRAIN STRUCTURE OF DIFFERENT MORPHOLOGY**

V.A. MOSKVINA^{1,2}, E.G. ASTAFUROVA², K.N. RAMAZANOV³

¹National Research Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

³Ufa State Aviation Technical University

E-mail: valya_moskvina@mail.ru

We studied structure, strength properties and fracture mechanism of austenitic stainless steel after thermomechanical treatments of two regimes, and further low-temperature ion nitriding. Thermomechanical treatments contributed to the formation of grain-(sub) grain structure of submicron scale in the steel containing high density of defects – the grain boundaries, dislocations and (sub)grain boundaries. Ion nitriding contributed to the formation of hardened surface layer with a microhardness of 11-12 GPa. Formation of grain-(sub)grain structure of submicron scale led to the formation of a brittle surface layers – thick nitrated layer and zone of internal nitriding (solid solution hardening) in steel.

Повысить коррозионную стойкость, микротвердость, износостойкость и усталостную прочность поверхностных слоев изделий из аустенитных нержавеющей сталей возможно комбинируя различные методы химико-термической обработки. Анализ современных литературных данных показал, что на сегодняшний день из всего многообразия методов поверхностного упрочнения азотирование является одним из наиболее распространенных способов структурно-фазового модифицирования металлов и сплавов. Перспективным методом создания материалов с упрочненным поверхностным слоем и вязкой матрицей является ионное азотирование [1], оно позволяет сократить время обработки материала и понизить температуру процесса по сравнению с азотированием в газе [2–3], а также дает возможность варьировать параметры азотированного слоя.

Данная работа направлена на установление влияния низкотемпературного ионного азотирования на особенности формирования упрочненного слоя и механизм разрушения аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3 с развитой зеренно-субзеренной структурой разной морфологии.

В качестве объекта исследования выбрали аустенитную сталь Fe-17Cr-13Ni-1.7Mn-2.7Mo-0.5Si-0.01C, мас.% (01X17H13M3). Термомеханическую обработку стали проводили по двум режимам с целью получения зеренно-субзеренной структуры субмикронного масштаба: режим 1 – прокатка при комнатной температуре до степени осадки 80% , режим 2 – прокатка до 80% и отжиг при температуре 600°C в течение 2 часов с последующей закалкой в воду.

Из заготовок, подвергнутых термомеханическим обработкам, вырезали образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части $1.7 \times 2.7 \times 18$ мм. После шлифовки и электролитической полировки образцы подвергали ионному азотированию при температуре 540°C в течение 12 часов на модернизированной установке ЭЛУ-5М (Уфа, УГАТУ). Рабочий газ при азотировании – смесь аргона, азота и ацетилена (Ar 70%, N_2 25%, C_2H_2 5%). После азотирования лопатки растягивали при комнатной температуре со скоростью деформации $4.6 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ на электромеханической установке Instron 3369 (одноосное растяжение).

После термомеханических обработок в стали были сформированы структурные состояния субмикронного масштаба с близкими размерами элементов структуры, но разной морфологией (рис. 1). Анализ рентгеноструктурных данных позволяет говорить о том, что независимо от режима обработки сталь имела структуру аустенита с параметром решетки 0.36 нм.

Механическая обработка стали прокаткой (режим 1) позволила сформировать в ней высоконеравновесную зеренно-субзеренную структуру с большим количеством дефектов (рис.1, а). Средний размер элементов структуры, определенный по электронно-микроскопическим изображениям, составил 220 ± 40 нм (рис. 1, б). В структуре стали, обработанной по режиму 1, наблюдали высокую плотность дислокаций $5 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Методом рентгеноструктурного анализа установлено что, размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) после обработки составили 110 нм ($\Delta d/d = 4 \times 10^{-3}$).

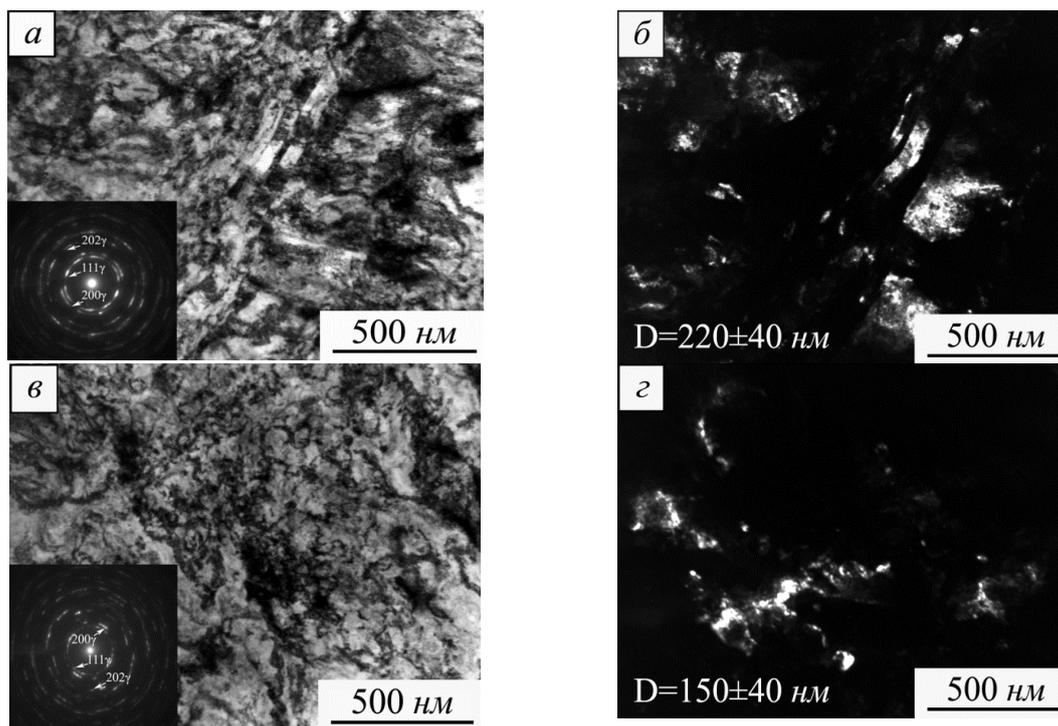


Рисунок 1 - Электронно-микроскопические изображения (а–г) структуры стали 01Х17Н13М3 в исходных состояниях: а, б – режим 1, в, г – режим 2; а, в – светлопольные изображения и микродифракционные картины (вклейки); б, г – темнопольные изображения к (а, в), полученные в рефлексах γ -Fe

Прокатка и последующий отжиг при температуре 600°C (режим 2) способствовали формированию структуры со средним размером (суб)зерна 150 ± 40 нм (рис. 1, г). Обработка по режиму 2 способствовала формированию в аустенитной стали высокодефектной, неравновесной структуры, но отжиг привел к релаксации внутренних напряжений после прокатки по сравнению с режимом 1. Величина микродеформации кристаллической решетки уменьшилась до 2×10^{-3} . Размеры ОКР для состояния, подготовленного по режиму 2, составили 165 нм и близки к размерам элементов зеренно-субзеренной структуры, определенным по электронно-микроскопическим изображениям.

В результате ионного азотирования происходит поверхностное упрочнение образцов, на поверхности стальных лопаток образуется хрупкий слой (рис. 2, а–б). Микротвердость азотированного слоя составляет 11-12 ГПа, а аустенитной матрицы – 1.8-2.0 ГПа. Толщина азотированного слоя, определенная по электронно-микроскопическим изображениям поверхностей излома (рис. 2), составляет 20–25 мкм и не зависит от режима обработки стали. Азотированный слой растрескивается с самого начала деформации растяжением. В образцах, подготовленных по режимам 1 и 2, содержащих изначально высокую плотность границ раздела - границ зерен, субзерен и дислокаций, на поверхности образцов при растяжении формируются грубые поперечные трещины. Более интенсивное растрескивание поверхности с образованием мелких сколов характерно для образцов, подготовленных по режиму 2. Поверхностный азотированный слой разрушается хрупко, в отличие от матрицы, которая деформируется и разрушается вязко с образованием ямок.

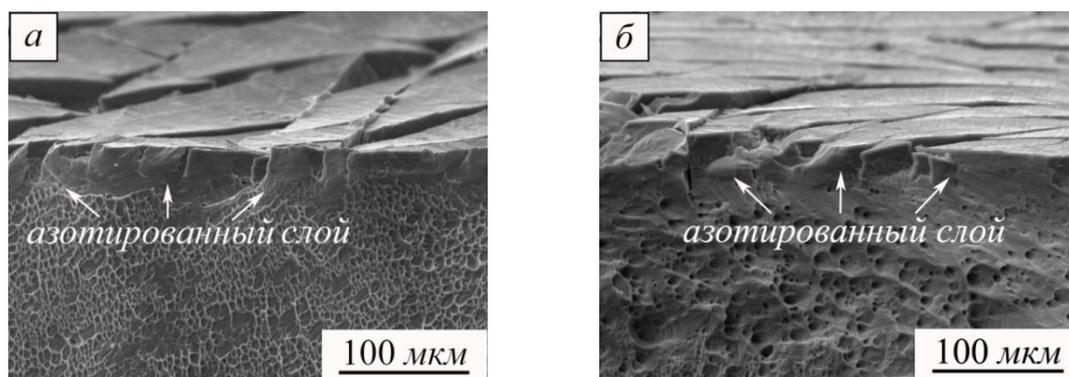


Рисунок 2 - Изображения поверхности излома азотированной стали после растяжения: а – обработка по режиму 1; б – по режиму 2

Между хрупким азотированным слоем и матрицей наблюдали формирование хрупкой переходной зоны (твердорастворное упрочнение аустенита азотом), с отличающимся от матричного и поверхностного характером излома. Переходная зона для образцов, обработанных по режиму 2, более выражена, микротвердость в ней выше, чем в образцах после прокатки (режим 1). Микротвердость в зоне с твердорастворным упрочнением последовательно уменьшается от 8 до 4 ГПа при переходе от поверхностного слоя к матрице. Толщина переходной зоны для образцов, подготовленных по режимам 1 и 2, составляет десятки микрометров. Параметр решетки в слое с твердорастворным упрочнением составляет 0.361-0.364 нм. Увеличенный по сравнению с исходным параметр решетки свидетельствует о высокой концентрации азота в твердом растворе в переходной зоне.

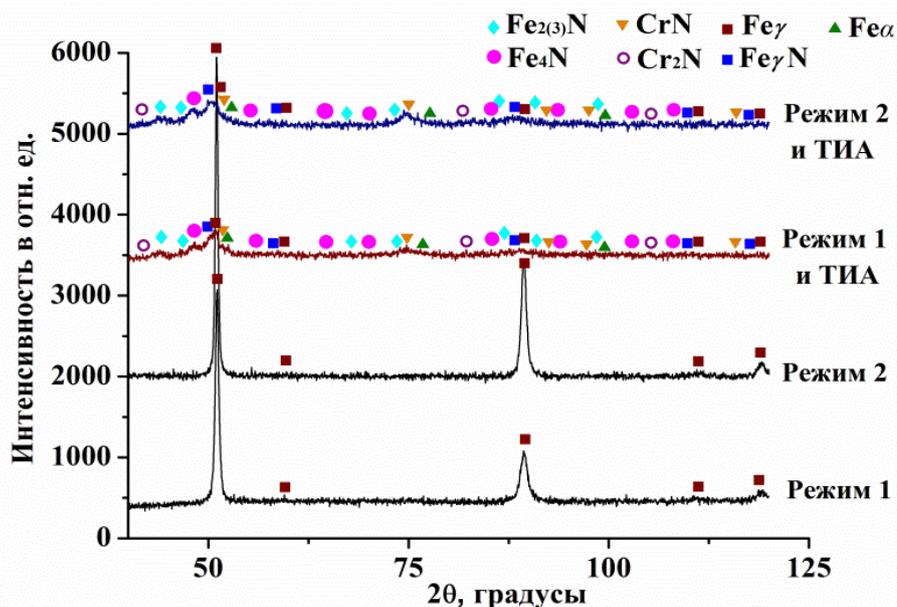


Рисунок 3 – Рентгенограммы для стали 01X17H13M3 после термомеханических обработок по режимам 1, 2; термомеханических обработок по режимам 1, 2 и ионного азотирования

По данным рентгеноструктурного анализа отжиг после прокатки (режим 2) способствует уменьшению ширины и увеличению интенсивности рентгеновских линий по сравнению с данными для образцов, обработанных по режиму 1 (рис. 3). Уширение рентгеновских линий обусловлено неравновесной, содержащей высокую плотность дефектов, структурой в стали после прокатки. После ионного азотирования наблюдали уменьшение интенсивности матричных рефлексов (рис. 3). На рентгенограммах, полученных от азотированных образцов, присутствуют рефлекс от матричного аустенита, легированного азотом аустенита, а основными фазами в поверхностных слоях азотированной стали являются нитриды различного состава и феррит.

Таким образом, ионное азотирование способствует поверхностному упрочнению аустенитной стали. Формирование зеренно-субзеренной структуры субмикронного масштаба приводит к образованию толстого азотированного слоя и небольшой зоны внутреннего азотирования в стали. После термомеханических обработок и ионного азотирования в структуре аустенитной стали 01X17H13M3 основными фазами в поверхностных слоях являются аустенит, пересыщенный азотом аустенит, нитриды различного состава и α -железо.

Исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

Список литературы

1. Филиппов М.А., Косицына И.И., Гервасьев М.А. Упрочнение и защита поверхности металлов. - Е.: УрО РАН, 2012. – 225 с.
2. Escalada L., Lutz J., Bruhl S.P., et al. // Surf. and Coat. Tech. - 2013. - V. 223. - P. 41-46.
3. Farokhzadeh K., Qian J., Edrisy A. // Mater. Sci. Eng. A. - 2014. - V. 589. - P. 199-208.