

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 03X17H13M3, ПОДВЕРГНУТОЙ
РАЗЛИЧНЫМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБРАБОТКАМ**

В.А. Москвина^{1,2}, К.Н. Рамазанов³

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

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

³Уфимский государственный авиационный технический университет,

Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, 450008

E-mail: valya_moskvina@mail.ru

**THE EFFECT OF ION NITRIDING ON MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE
MECHANISM OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL SUBJECTED TO DIFFERENT
THERMOMECHANICAL TREATMENT**

V.A. Moskvina^{1,2}, K.N. Ramazanov³

Scientific Supervisor: assistant professor, doctor of sciences (Phys & Math) E.G. Astafurova²

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademichesky pr. 2/4, 634055

³Ufa State Aviation Technical University,

Russia, the Republic of Bashkortostan, Ufa, K. Marx Street 12, 450008

E-mail: valya_moskvina@mail.ru

***Abstract.** Mechanical properties and fracture mechanism of austenitic stainless steel after thermomechanical processing and ion nitriding were investigated. Nitriding contributes to a surface hardening of steel specimens, changes their strength characteristics, and reduces plastic properties due to the formation of a brittle surface layer on the samples. Formation of high-defective grain/subgrain structure with a high density of dislocations contributes to strengthening of the samples under ion nitriding and formation of thicker hardened layer compared to fine-crystalline and coarse-crystalline samples.*

Нержавеющие аустенитные стали нашли широкое применение во многих отраслях современной промышленности благодаря высокой устойчивости против коррозии и технологичности. Данная работа направлена на установление влияния исходной термомеханической обработки и различных режимов ионного азотирования на механические, пластические свойства и механизм разрушения аустенитной стали 03X17H13M3.

Объектом исследования была выбрана стабильная аустенитная сталь Fe-17Cr-13Ni-1,7Mn-2,7Mo-0,5Si-0,01C мас.% (03X17H13M3). Термомеханическую обработку стали проводили по следующим режимам: режим 1 – прокатка до степени осадки 80%, режим 2 – прокатка до 80% и отжиг при

температуре 600°C (2 ч.), режим 3 – прокатка до 80% и отжиг при 900°C (2 мин.), режим 4 – прокатка до 80% и отжиг при 1000°C (7 мин.) и режим 5 – прокатка до 40% и отжиг при 1050°C (5 ч.). После термической обработки образцы закаливали в воду. Отжиги по режимам 3,4,5 были проведены для получения разного размера зерна. После термомеханических обработок из заготовок вырезали образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части 1,7×2,7×18 мм. Стальные лопатки подвергали ионному азотированию при температуре 540°C в течение 12 часов. В качестве рабочего газа использовали смесь аргона, азота и ацетилена (Ar 70%, N₂ 25%, C₂H₂ 5%). Ионное азотирование проводили по 2 режимам: при давлении рабочего газа P=300 Па – традиционное ионное азотирование (ТИА) и при P=60 Па – ионное азотирование с эффектом полого катода (ЭПК). После азотирования образцы подвергали одноосному растяжению при комнатной температуре с относительной скоростью деформации 4,6×10⁻⁴ с⁻¹.

Во всех исходных состояниях сталь имела структуру аустенита с параметром решетки 0,36 нм. Обработка по режиму 1 обеспечила формирование в стали высоконеравновесной зеренно-субзеренной структуры со средним размером элементов 220±50 нм и высокой плотностью дислокаций 5×10¹⁴ м⁻². Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) после обработки составляли 110 нм, а микродеформация кристаллической решетки 4×10⁻³. Формированию ультрамелкозернистой структуры с размером (суб)зерна 150±40 нм способствовали прокатка и отжиг при температуре 600°C (режим 2). По данным рентгеноструктурного анализа величина микродеформации кристаллической решетки после отжига уменьшилась до 2×10⁻³, а размеры ОКР составили 165 нм. Обработки по режимам 3–5 обеспечили формирование равновесной зеренной структуры с разным размером зерна: 3 мкм (режим 3), 7 мкм (режим 4) и 70 мкм (режим 5). Микродеформация кристаллической решетки для образцов, обработанных по режимам 3–5, составила ~10⁻⁴, а размеры ОКР более 200 нм. На рисунке 1 представлены истинные кривые течения для исходных состояний образцов стали (рис. 1, а), состояний после ТИА (рис. 1, б) и ионного азотирования с ЭПК (рис. 1, в).

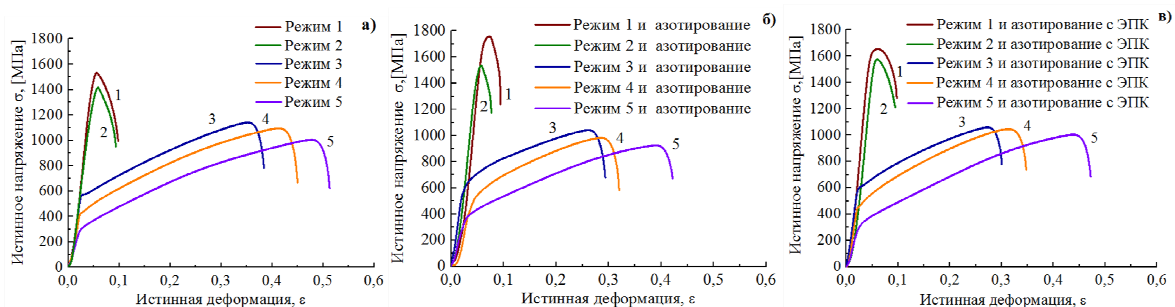


Рис. 1. Истинные кривые течения стали 03X17Ni3M3 в исходном состоянии (а), после ТИА (б) и ионного азотирования с ЭПК (в)

Прокатка способствовала формированию высокопрочного состояния (рис. 1, а, кривая 1) с низкой пластичностью. Отжиг при температуре 600°C способствует релаксации структуры после прокатки, приводит к уменьшению прочностных свойств, но они, по-прежнему, имеют высокие значения, как и после обработки по режиму 1 (рис. 1, а, кривые 1–2). Прочностные свойства стали возрастают после ионного азотирования. Применение эффекта полого катода способствует меньшему упрочнению образцов стали по сравнению с традиционным ионным азотированием. Наиболее ярко это проявляется в

образцах, подвергнутых обработке по режиму 1, с высокодефектной структурой после прокатки. Образцы, обработанные по режимам 1 и 2, деформируются локализовано.

Анализ кривых течения в исходных состояниях показывает, что с увеличением размера зерна (обработки 3–5) происходит уменьшение пределов текучести и прочности, а также увеличение пластичности образцов стали (рис. 1, а, кривые 3–5). В отличие от образцов, обработанных по режимам 1 и 2, деформация в них как до, так и после азотирования, реализуется однородно. ТИА способствует большему эффекту упрочнения и вызывает большее охрупчивание образцов по сравнению с ЭПК.

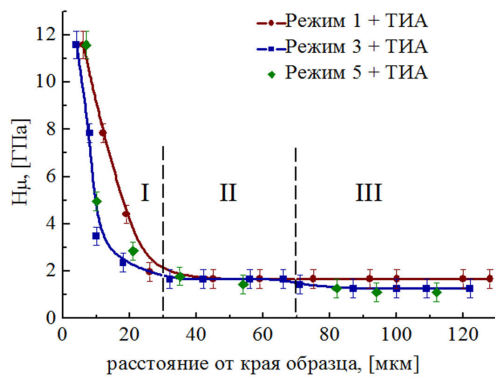


Рис. 2. Зависимость микротвердости от расстояния от края образца в стали после ТИА и обработок по режимам 1,3,5

В результате ионного азотирования происходит поверхностное упрочнение образцов, на поверхности стальных лопаток образуется хрупких слой. В поперечном сечении образцов формируются 3 зоны (рис. 2): зона I – соответствует азотированному слою, II – переходная зона с твердорастворным упрочнением аустенита азотом, III – аустенитная матрица. Эти данные подтверждаются рентгеноструктурным анализом азотированных образцов. Микротвердость азотированного слоя (рис.2) составляет 11-12 ГПа, а матрицы 1,5-2,0 ГПа. Анализ электронно-микроскопических изображений поверхностей излома свидетельствует о том, что толщина азотированного слоя составила 10–25 мкм и последовательно уменьшается при переходе от образцов, обработанных по режиму 1 к режиму 5. Толщина переходной зоны различна для деформированных (режимы 1 и 2), мелкокристаллических (обработки 3,4) и крупнокристаллических (режим 5) образцов. Она составляет десятки микрометров для деформированных состояний (режимы 1 и 2), а для образцов, подготовленных по режимам 3–5, толщина переходной зоны увеличивается до ≈ 100 мкм. В присутствии азотированного слоя матрица разрушается вязко, а поверхностный азотированный слой разрушается хрупко – сколом.

На рентгенограммах, полученных с поверхности азотированных образцов, присутствуют рефлексы от матричной аустенитной фазы (слабые, в образцах, обработанных по режимам 3–5) и легированного азотом аустенита (переходная зона с параметром решетки 0,361-0,364 нм). Большой по сравнению с исходными состояниями параметр решетки свидетельствует о высокой концентрации азота в твердом растворе в переходной зоне. Помимо аустенита, основными фазами в поверхностных слоях азотированной стали являются нитриды Cr_2N , FeN , $\text{Fe}_{(2,3)}\text{N}$, Fe_4N и феррит. В образцах с исходно деформированной структурой (обработки 1 и 2) интенсивность матричных рефлексов после азотирования с ЭПК меньше, чем после ТИА, что свидетельствует о большей толщине азотированного слоя и переходной зоны в первом случае.

Таким образом, ионное азотирование способствует изменению прочностных характеристик, снижает пластические свойства стали 03X17H13M3, что обусловлено образованием хрупкого поверхностного слоя на образцах. Формирование зеренно-субзеренной структуры субмикронного масштаба обеспечивает образование более толстого упрочненного поверхностного слоя по сравнению с мелкозернистыми и крупнозернистыми образцами, для которых характерно формирование обширной переходной зоны.