

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/67

**ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ АУСТЕНИТНОЙ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА**

¹Москвина В.А., ¹Астафурова Е.Г., ²Рамазанов К.Н., ¹Майер Г.Г., ¹Астафуров С.В.,
¹Мельников Е.В., ¹Панченко М.Ю., ^{1,3}Загибалова Е.А.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

²*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия*

³*НИ Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Одна из основных проблем аустенитных нержавеющей сталей (АНС) – низкие прочностные свойства и износостойкость – может быть частично или полностью устранена путем модификации поверхности изделий и создания упрочненных поверхностных слоев [1]. Доступным и эффективным методом поверхностного упрочнения сложных деталей конструкций является ионно-плазменное насыщение сплавов атомами внедрения, которое проводится в смеси газов различного состава. При этом, механические и пластические свойства обработанных материалов определяются комплексом свойств базового сплава и упрочненной поверхности, и разделить эти вклады не всегда возможно. Метод наноиндентирования позволяет установить локальные механические и пластические характеристики отдельных областей упрочненных материалов (поверхностных слоев) путем динамического нагружения локальных участков микроскопического объема [2,3].

В настоящей работе с использованием метода наноиндентирования были установлены микромеханические характеристики композиционных слоев, сформированных в результате ионно-плазменного поверхностного насыщения в смеси газов Ar+N₂+C₂H₂ образцов стабильной АНС 01X17Н13М3 с разным размером зерна.

Исходные гомогенизированные заготовки АНС Fe-17Cr-13Ni-1.7Mn-2.7Mo-0.5Si-0.01C (мас. %) подвергали термомеханическим обработкам (ТМО) по разным схемам: прокатка при комнатной температуре (Т_к) до степени обжатия $\varepsilon = 80\%$ и последующий отжиг при 900°C (2 мин.) (ТМО-1); прокатка до $\varepsilon = 80\%$ при Т_к и отжиг при 1000°C (7 мин.) (ТМО-2); прокатка до $\varepsilon = 40\%$ при Т_к и отжиг при 1050°C (5 ч.) (ТМО-3). После ТМО из заготовок вырезали образцы с линейными размерами 1.7×2.7×18 мм. Ионно-плазменную обработку (ИПО) проводили на модернизированной установке ЭЛУ-5 в смеси газов Ar(70 %) + N₂(25 %) + C₂H₂(5 %), давлении 300 Па, температуре насыщения 540°C в течение 12 часов. Размер зерна образцов после ТМО определяли методом секущих по изображениям, полученным методом световой микроскопии (Альтами МЕТ 1С). Динамическое наноиндентирование осуществляли с применением индентора Виккерса при постоянной нагрузке 3 мН (CSEM Nano Hardness Tester). Обработку полученных данных осуществляли с применением методики расчета Оливера-Фарра [2]. Измерения проводили от обработанной поверхности к центру образцов. Пластические характеристики поверхностных слоев образцов стали после ИПО были рассчитаны с применением подхода, предложенного Ю. Мильманом [4].

ТМО по разным схемам способствует формированию равновесной зеренной структуры в стали: мелкокристаллической с размерами зерен $d = 3$ мкм (ТМО-1) и $d = 7$ мкм (ТМО-2) и крупнокристаллической с $d = 70$ мкм (ТМО-3). Анализ диаграмм нагружения показал, что максимальная глубина проникновения индентора (h_{\max}) в материал зависела от размера зерна как $h_{\max 1} < h_{\max 2} < h_{\max 3}$ для ТМО-1, ТМО-2 и ТМО-3 образцов, соответственно. С увеличением размера зерна стали значение нанотвердости уменьшается. Для мелкокристаллических образцов нанотвердость составляет HV=3.2 ГПа и HV=2.9 ГПа, а для крупнокристаллической HV=2.7 ГПа. Эти различия обусловлены разной объемной долей границ зерен и плотностью дефектов кристаллического строения в образцах после ТМО по разным режимам.

Независимо от режима ТМО на поверхности образцов, подвергнутых ИПО в смеси газов, образуется гетерофазный композиционный слой толщиной ≈ 12 –17 мкм (ТМО-1, ТМО-2) и ≈ 25 мкм (ТМО-3). Нанотвердость изменяется нелинейно в зависимости от расстояния от

Секция 2. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

обработанной поверхности вглубь образцов. Анализ профилей распределения нанотвердости по глубине позволил выявить три характерные области, типичные для всех образцов независимо от их размера зерна: композиционный слой, диффузионную зону и матрицу. С увеличением размера зерна толщина композиционного слоя и диффузионной зоны увеличиваются. После ИПО образцы ТМО-3 с крупнокристаллической структурой характеризуются наибольшими значениями нанотвердости в композиционном слое $HV=17$ ГПа по сравнению с образцами с мелкокристаллическими структурами $HV=12$ ГПа (ТМО-1) и $HV=10$ ГПа (ТМО-2). Высокие значения нанотвердости в композиционных слоях обусловлены комплексным упрочнением образцов: твердорастворным упрочнением аустенита азотом и углеродом, дисперсионным твердением - образованием нитридов и карбонитридов различного состава. После ИПО для образцов с мелкокристаллическими структурами характерен значительный разброс значений нанотвердости в композиционных слоях по сравнению с крупнокристаллическими образцами. Это может быть связано с увеличением объемной доли границ зерен, которые являются наиболее благоприятными местами для зарождения нитридных и карбонитридных фаз в образцах [1]. По мере продвижения от композиционного слоя к матрице значения нанотвердости постепенно снижаются для всех образцов. Диффузионная зона в ТМО-3 образцах достигает ≈ 50 мкм, и уменьшается на десятки микрометров с уменьшением размера зерна (≈ 30 мкм и ≈ 35 мкм для образцов ТМО-1 и ТМО-2, соответственно). Пластические характеристики в матрицах для образцов с разным размером зерна примерно одинаковы. В образцах после ИПО пластические характеристики композиционных слоев различаются и с увеличением толщины композиционного слоя уменьшаются, а также имеют низкую деформационную способность из-за наличия нитридных и карбонитридных фаз. Вид кривых нагрузки-разгрузки также свидетельствует о наличии трех характерных областей после ИПО в образцах с разным размером зерна. Для всех типов образцов площадь под кривыми в упрочненном слое и в диффузионной зоне увеличивается по мере продвижения от композиционного слоя к матрице. Постепенное уменьшение значений нанотвердости и увеличение площади под кривыми нагружения возникает в результате того, что по мере удаления от поверхностного композиционного слоя вглубь образца вклад соотношения дисперсионного твердения уменьшается и превалирует твердорастворное упрочнение (диффузионная зона) [5].

Таким образом, для образцов аустенитной нержавеющей стали 01X17H13M3 с разной объемной долей границ зерен и после ионно-плазменной обработки в смеси газов аргона, азота и ацетилена показана зависимость диаграмм нагружения при наноиндентировании, величин нанотвердости и пластических характеристик композиционных слоев в зависимости от расстояния до обрабатываемой поверхности.

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

1. Lo K.H., Shek C.H., Lai J. K.L. Recent development in stainless steels // Mat. Sci. and Eng.: R: Reports. 2009. Vol. 65. P. 39–104.
2. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res.: 1992. Vol 7. P. 1564–1583.
3. Головин Ю.И., Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроразмерах, тонких приповерхностных слоях и пленках // Физика твердого тела: 2008. том 50. вып. 12. С. 2113–2142.
4. Yu. V. Milman, B. A. Galanov, S. I. Chugunova. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement // Acta metall, mater.: 1993. Vol 41 (9). P. 2523–2532.
5. Moskvina V., Astafurova E., Maier G., et al. A role of initial microstructure in characteristics of the surface layers produced by ion-plasma treatment in CrNiMo austenitic stainless steel // Mat. Charact. 2019. Vol. 153. P. 372–380.