

# **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»**

Томск  
Издательский Дом ТГУ  
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/191

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СТАТИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ АТОМОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ Cr-Mn-N АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ**

<sup>1</sup>Наркевич Н.А., <sup>1</sup>Сурикова Н.С., <sup>1</sup>Перевалова О.Б., <sup>1</sup>Власов И.В.,  
<sup>2</sup>Наркевич В.В., <sup>1</sup>Дерюгин Е.Е.

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*  
<sup>2</sup>*Томский политехнический университет, Томск*

Структура, фазовый и химический состав приповерхностного слоя определяют свойства металлических материалов при механическом и трибологическом нагружении [1]. Для упрочнения поверхности сталей и сплавов широко применяются деформационные обработки [2-4], при проведении которых измельчение структуры до наноразмерной и инициированные деформированием фазовые превращения сопровождаются локальным нагревом поверхности и окислением. Обработка лазерным или электронным пучком тоже вызывает изменение химического и фазового состава [5], а также напряженного состояния в приповерхностном слое [6]. Представляет научный и практический интерес исследование химического состава, структуры и статических смещений атомов кристаллической решетки, вызывающих микронапряжения III рода, в приповерхностном слое стали после комбинированной механотермической обработки, включающей поверхностное пластическое деформирование и, затем, электронно-лучевую обработку.

Исследовали аустенитную нержавеющую сталь Fe-16.5Cr-18.8Mn-0.53N-0.07C. В одной серии экспериментов после закалки от 1100<sup>o</sup>C поверхность стали упрочняли ультразвуковой ковкой (УЗК) [2,3], в другой - фрикционной обработкой (ФО) [4]. После деформационных обработок проводили обработку (ЭЛО) на электронно-лучевой установке (ИФПМ СО РАН, Россия) непрерывным сфокусированным электронным пучком при остаточном давлении  $P = 0,1$  Па. Технологические параметры ЭЛО: частота сканирования электронного луча 200 Гц, ток электронного луча  $I = 0,02$  А, максимальная энергия электронов  $E = 27$  кэВ, скорость перемещения обрабатываемых образцов относительно электронного луча  $V = 15$  мм/с. Изменение химического состава приповерхностного слоя образцов изучали методом Оже-электронной спектроскопии (AES «Шхуна-2», Россия). Параметры структуры и углы разориентации элементов структуры были оценены EBSD методом на приборе Quanta 3D. Топографию поверхности исследовали на профилометре New View (Zygo, США). Статические смещения атомов ГЦК решетки определяли из анализа соотношения интенсивностей пар дифракционных максимумов (200)-(400) и (111)-(222) методом рентгеновской дифракции в  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$  излучении. Износостойкость определяли при испытаниях по схеме шарик/диск с нагрузкой 3 Н при скорости скольжения шарика из ВК6 30 мм/с и числе оборотов  $n = 6000$ .

Исследования показали, что приповерхностный слой стали после деформационных обработок (ФО и УЗК) на глубине до 300 нм сильно обогащен кислородом. Последующая ЭЛО поверхности оказывает рафинирующее действие. Так, при проведении ФО с последующей ЭЛО, концентрация кислорода на глубине 50 нм уменьшается примерно в 10 раз. После УЗК с последующей ЭЛО концентрация кислорода в поверхностном слое уменьшается только на 25%, а на глубине 50 нм примерно в 3 раза. Таким образом, при одинаковых параметрах ЭЛО рафинирование после УЗК менее эффективно, чем после ФО. Больше удаление кислорода из приповерхностного слоя после ФО достигается благодаря топографическим особенностям поверхности, сформированной скользящим индентором. Более мелкие и неглубокие выступы ( $R_a = 0,4$  мкм) при обработке электронным лучом быстрее прогреваются до оплавления, чем бугры ( $R_a = 3,6$  мкм) в отчеканенной УЗК поверхности. После ФО и последующей ЭЛО происходит полная перекристаллизация с образованием мелкозернистой — 2 мкм структуры и преимущественно высокоугловыми границами. Приповерхностный слой, упрочненный УЗК, при тех же параметрах последующей ЭЛО нагревается ниже температур ликвидуса. При этом в основном сохраняется дефектная структура, сформированная УЗК, которую можно

#### Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

охарактеризовать как субзеренную с преимущественно малоугловыми границами. Доля малоугловых границ с разориентацией  $\leq 5$  градусов составляет 65%. Рафинирование поверхностного слоя ЭЛО без оплавления менее эффективно, так как удаляется только 20-25% кислорода.

Повышенное содержания кислорода в приповерхностном слое коррелирует с увеличением смещений атомов в ГЦК решетке. В величине смещений наблюдается анизотропия: в направлении  $\langle 100 \rangle$  величина смещений атомов в решетке аустенита больше, чем в направлении  $\langle 111 \rangle$ , таблица 1. Рафинирование при обработке электронным лучом уменьшает смещения атомов в ГЦК решетке.

Таблица 1. Статические смещения атомов в ГЦК решетке  $\sqrt{\langle u^2 \rangle}/4$ , формирующие микронапряжения III рода в направлениях  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$

Вид обработки	$\langle 100 \rangle \sqrt{\langle u^2 \rangle}/4$ , нм	$\langle 111 \rangle \sqrt{\langle u^2 \rangle}/4$ , нм
Закалка	0.0042	0
Фрикционная обработка	0.0059	0.0047
Фрикционная обработка + электронно-лучевая обработка	0.0052	0.0012
Ультразвуковая ковка	0.0046	0.0027
Ультразвуковая ковка + электронно-лучевая обработка	0.0044	0.0020

Увеличение смещений атомов в ГЦК решетке является проявлением ее неустойчивости и связано с предмартенситными явлениями [7]. Результаты [3] и других работ показывают, что при интенсивном пластическом деформировании стали того же состава, что и в настоящей работе, образуется  $\varepsilon$ -мартенсит с ГПУ решеткой. Следовательно, нестабильность решетки может свидетельствовать о предпосылках к облегченному  $\gamma \rightarrow \varepsilon$  превращению при механическом и трибологическом нагружении. Прослеживается взаимосвязь между величиной статических смещений атомов в ГЦК решетке и сопротивлением изнашиванию. Так, износостойкость стали после ФО в 1,5 раза выше, чем для закаленной стали, после УЗК - в 1,3 раза. Еще большее увеличение износостойкости (до 100 крат) показывает комбинирование обработок типа: ФО + ЭЛО и УЗК + ЭЛО.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук России на 2013-2020 годы, направление III.23.

1. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 5. С. 7-15.
2. Сурикова Н.С., Наркевич Н.А., Суриков Н.Ю., Власов И.В., Овчинников С.В., Миронов Ю.П., Гриценко Б.П. Влияние ультразвуковой ударной обработки на механические свойства монокристалла никелида титана // ФММ. 2016. Т. 117. № 10. С. 1096-1104.
3. Наркевич Н.А., Шулепов И.А., Миронов Ю.П. Структура, механические и триботехнические свойства аустенитной азотистой стали после фрикционной обработки // ФММ. 2017. Т. 118. № 4. С. 421-428.
4. Макаров А.В., Коршунов Л.Г. Металлофизические основы наноструктурирующей фрикционной обработки сталей // ФММ. 2019. Т.120. № 3. С. 327-336.
5. Meisner L.L., Markov A.B., Rotshtein V.R. Ozur G.E., Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Mironov Yu.P., Poletika T.M., Girsova S.L., Shepel D.A. Microstructural characterization of Ti-Ta-based surface alloy fabricated on TiNi SMA by additive pulsed electron-beam melting of film/substrate system // J. Alloys and Comp. 2018. V. 730. P. 376-385.
6. Наркевич Н.А., Дураков В.Г., Сурикова Н.С., Миронов Ю.П., Мельников А.Г., Перевалова О.Б., Шугуров А.Р., Шулепов И.А., Наркевич В.В. Структура и деформации кристаллической решетки в поверхностном слое Cr-Mn-N стали, сформированном комбинированием фрикционной и электронно-лучевой обработок // ФММ. 2019. Т.120. № 10.
7. Михайлов Ю.Н., Дубинин С.Ф. Длинноволновые статические смещения атомов в сплавах ГАММА-FeNi // ФТТ. 2004. Т.46. №12. С. 2113-2118.