

Комплексная модификация поверхностного слоя нержавеющей высоколегированной стали – структура и свойства

Ю. Иванов, Е. Петрикова, А. Тересов, И. Лопатин, С. Лыков*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**yufi55@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена анализу результатов, полученных при исследовании структуры, механических (микротвердость) и трибологических (параметр износа и коэффициент трения) свойств высокохромистой стали марки 20X23H18, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом. Установлено, что предварительное облучение стали импульсным электронным пучком в режиме плавления тонкого поверхностного слоя и последующее азотирование приводит к существенному (на 39%) увеличению твердости относительно азотированной необлученной стали и многократному (в 9 раз) увеличению твердости относительно исходной стали. Показано, что азотирование стали 20X23H18 (не зависимо от предварительной обработки), позволяет повысить износостойкость материала в 100 и более раз.

Ключевые слова: высокохромистая сталь, импульсный электронный пучок, плазма дугового разряда, микротвердость, износостойкость, структура.

1. Введение

Использование дуговых разрядов низкого давления с накаливаемым катодом (концентрация плазмы $10^{15}–10^{18} \text{ м}^{-3}$ в объемах до нескольких м^3) в настоящее время является одним из наиболее перспективных методов азотирования стали [1]. Данный метод, обеспечивая генерацию потока газовой плазмы без микрокапель, позволяет осуществлять ионную очистку (травление) поверхности и разогревать обрабатываемую деталь до требуемой температуры [2–4]. В [5] показано, что предварительная обработка поверхности металлов и сплавов концентрированными потоками энергии позволяет интенсифицировать процесса азотирования. В настоящей работе предварительную обработку поверхности стали осуществляли, облучая образцы импульсным электронным пучком, используя установку «СОЛО». Установка «СОЛО» оснащена электронным источником с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы, позволяет генерировать электронный пучок с током до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ, длительностью импульса 20–200 мкс, плотностью энергии в импульсе до 80 Дж/см², частотой следования импульсов до 15 с⁻¹ [6]. Все параметры можно регулировать плавно и независимо друг от друга. Использование ускоряющего напряжения до 25 кВ не требует наличия дополнительной радиационной защиты.

Целью настоящей работы является анализ результатов, полученных при исследовании структурно-фазового состояния высокохромистой стали марки 20X23H18, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом.

2. Материал и методики исследования

В качестве материала исследования использовали образцы высокохромистой стали марки 20X23H18 (зарубежный аналог AISI 310S) (0,2C-1Si-2Mn-(17-20)Ni-(22-25)Cr-0.02S-0.035P, остальное – Fe, вес. %). Образцы имели форму пластинок размерами 10×10×5 мм. Азотирование стали осуществляли на установке «ТРИО» при температурах 723–873 К в

течение (1, 3 и 5) часов. Температура процесса измерялась хромель-алюмелевой термопарой, закрепленной через кварцевый стаканчик в держателе образцов. Перед азотированием поверхность части образцов облучали импульсным электронным пучком при следующих параметрах: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 , длительность импульса тока 200 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0.3 с^{-1} . Методами математического моделирования показано, что при данных параметрах облучения на поверхности образцов достигается температура 2400 К, что приводит к высокоскоростному ($1.5 \cdot 10^6 \text{ К/с}$) плавлению поверхностного слоя толщиной до 15 мкм.

Исследование структуры, элементного и фазового состава модифицированной стали осуществляли методами рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Механические свойства стали характеризовали микротвердостью (нагрузка на индентор 0.5–2 Н). Трибологические свойства характеризовали износостойкостью и коэффициентом трения, которые определяли при следующих параметрах испытаний: шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, радиус трека – 2 мм, нагрузка на индентор 1 Н, скорость вращения образца 25 мм/с, условиях сухого трения при комнатной температуре; степень износа материала определяли по результатам профилометрии сформировавшегося при испытаниях трека.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Обработка нержавеющей стали 20Х23Н18 импульсным электронным пучком сопровождается формированием на поверхности облучения высокорельефной структуры, характеризующейся наличием большого количества заплывших микрократеров (Рис.1а). В объеме зерен наблюдается структура ячеистого типа, свидетельствующая о плавлении и последующей высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя материала (Рис.1б).

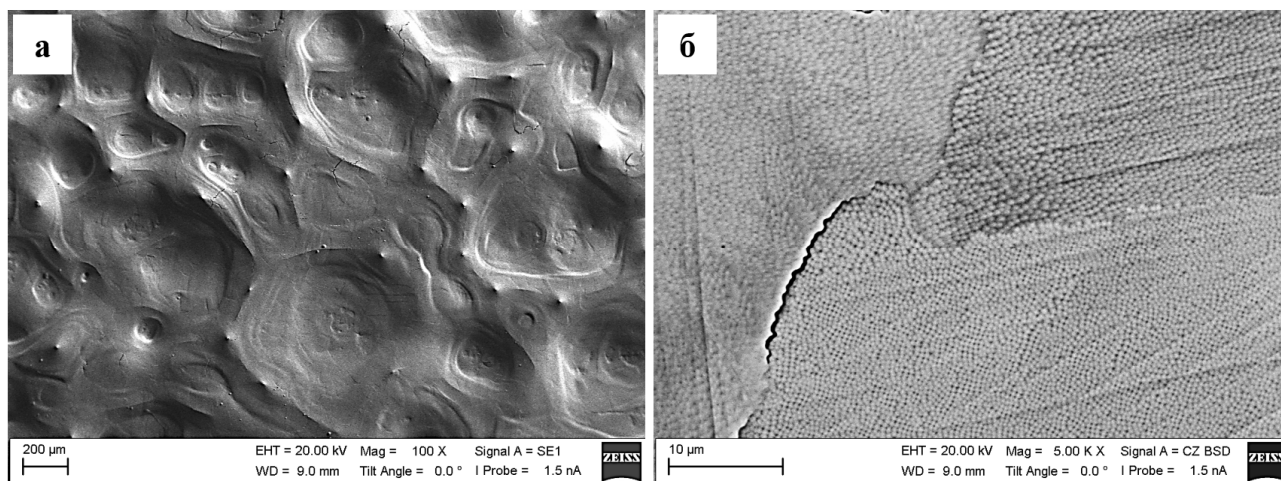


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности стали 20Х23Н18, облученной импульсным электронным пучком.

Размер ячеек кристаллизации изменяется в пределах от 330 нм до 500 нм. Следует отметить присутствие на поверхности стали микротрещин, расположенных вдоль границы зерен. Последнее указывает на высокий уровень остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое стали в результате высокоскоростного охлаждения. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в объеме ячеек кристаллизации присутствует дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций.

Скалярная плотность дислокаций $2.3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации выявляются наноразмерные частицы второй фазы. Анализ микроэлектроннограмм позволяет утверждать, что данные частицы являются α -хромом и карбидом хрома состава Cr_7C_3 .

Измерения микротвердости стали (нагрузка на индентор 0.5 Н) показали, что облучение стали сопровождается упрочнением поверхностного слоя. Микротвердость образцов увеличивается от 2.1 ГПа в исходном состоянии до 2.4 ГПа после облучения. Установлено, что облучение стали приводит к незначительному росту коэффициента износа (снижению износостойкости) стали от $4.9 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ (сталь в исходном состоянии) до $5.2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ после облучения.

Осуществлено азотирование стали в необлученном состоянии и после облучения импульсным электронным пучком. Установлено, что максимальная твердость в большинстве случаев выявляется на образцах (не зависимо от режима предварительной обработки) после азотирования при температуре 793 К в течение 3 часов и составляет для предварительно облученной стали 19 ГПа (Рис.2а, кривая 1) и 13.7 ГПа для стали без облучения (Рис.2а, кривая 5). Следовательно, предварительное облучение стали импульсным электронным пучком приводит к существенному (на 39%) увеличению твердости азотирования стали и многократному (в 9 раз) увеличению твердости относительно твердости исходной стали.

Для образцов (исходного и облученного), подвергнутых азотированию при 793 К, 3 час., построены профили микротвердости (Рис.2б). Отчетливо видно, что толщина упрочненного слоя (не зависимо от режима предварительной обработки) составляет 40–45 мкм. Исключая поверхностный слой толщиной ≈ 10 мкм, твердость азотированной стали без предварительного облучения несколько выше твердости стали после облучения и последующего азотирования.

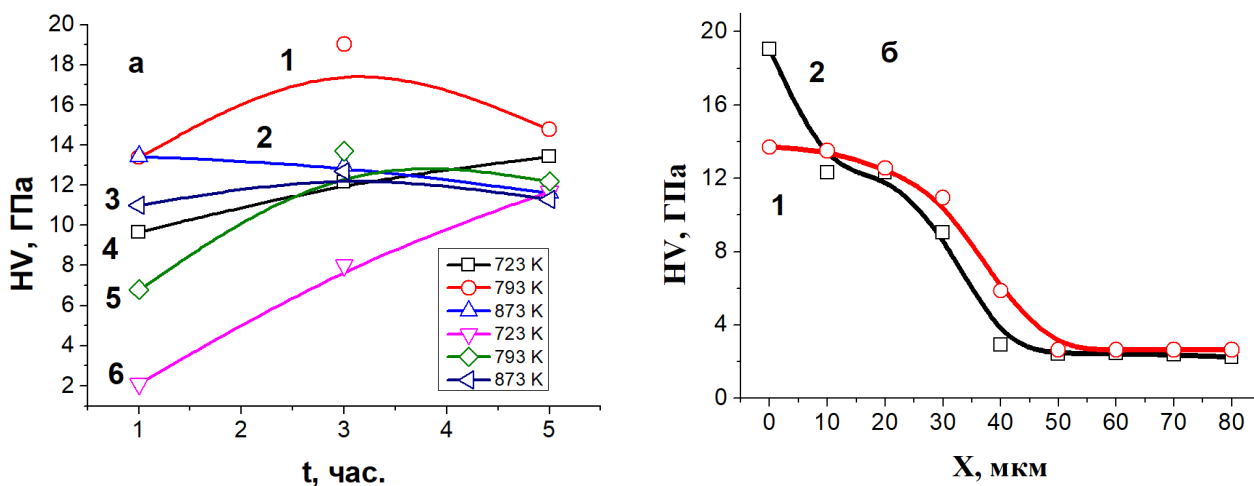


Рис.2. Зависимость от времени азотирования микротвердости образцов стали 20X23N18, облученных импульсным электронным пучком и подвергнутых последующему азотированию (а); 4 – облучение + 723 К; 1 – облучение + 793 К; 2 – облучение + 873 К; 6 – 723 К; 5 – 793 К; 3 – 873 К; (б) – профиль микротвердости после азотирования (793 К, 3 час.) исходной стали (кривая 1) и стали после предварительного облучения (кривая 2). Твердость стали в исходном состоянии 2.1 ГПа.

Трибологические свойства модифицированных образцов стали характеризовали параметром износа (величина, обратная износостойкости) и коэффициентом трения. Анализируя результаты, представленные на Рис.3, можно отметить, что наиболее высокую износостойкость продемонстрировали образцы стали 20X23N18, подвергнутые комплексной

обработке по следующим режимам: (1) сталь в исходном состоянии, подвергнутая азотированию при температуре 873 К, 3 час. ($k = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) (Рис.3, кривая 6) и (2) облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование при температуре 793 К, 3 час. ($k = 0.7 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) (Рис.3, кривая 4). Следовательно, азотирование стали 20Х23Н18 в плазме газового разряда низкого давления позволяет повысить износостойкость материала в 100 и более раз не зависимо от режима предварительной обработки.

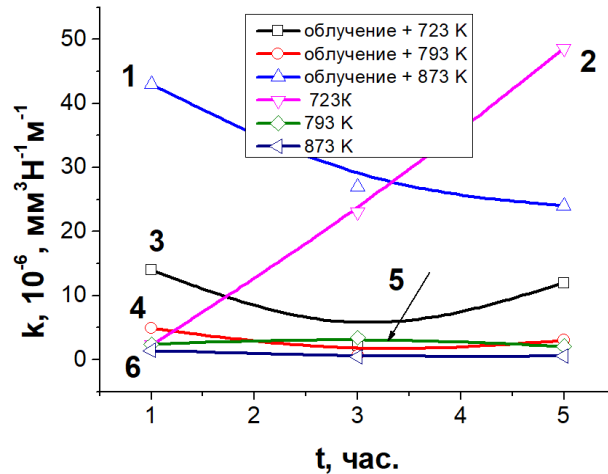


Рис.3. Зависимость параметра износа k от времени азотирования при температуре 723 К (кривые 2 и 3), 793 К (кривые 4 и 5); 873 К (кривые 1 и 6); кривая 1, 3, 4 – сталь после предварительного облучения электронным пучком; кривые 2, 5, 6 – сталь в исходном состоянии.

Очевидно, что многократное увеличение твердости и износостойкости стали обусловлено изменением структурно-фазового состояния образцов в процессе азотирования. Методами рентгеноструктурного анализа проведены исследования фазового состава стали. Для сравнения рассмотрим результаты, полученные при исследовании образцов, показавших наиболее высокие значения твердости и износостойкости, а именно, образцов, подвергнутых азотированию при температуре 793 К, 3 час. Рентгенограмма одного из таких образцов приведена на Рис.4.

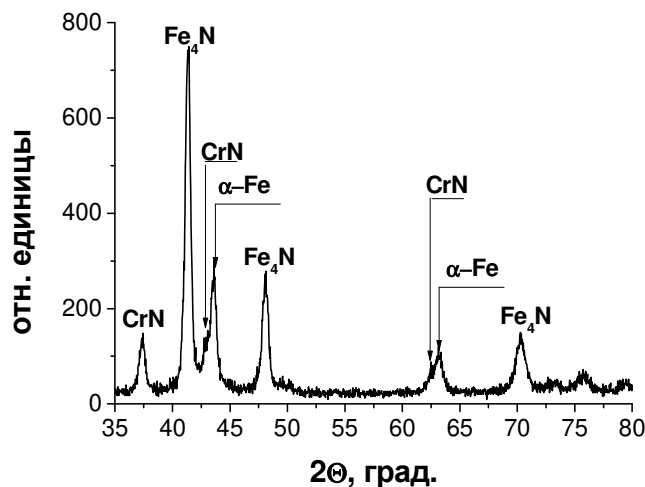


Рис.4. Участок рентгенограммы образца стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 час.).

Установлено, что основными фазами поверхностного слоя исследуемых образцов являются нитриды железа и хрома, твердые растворы на основе α -Fe и γ -Fe. Относительное содержание нитридных фаз, не зависимо от состояния стали перед азотированием (исходное или облученное), составляет 89–91 объемн.%. Однако в образце, предварительно облученном импульсным электронным пучком, относительное содержание фазы CrN после азотирования в 2.5 раза выше, чем в стали необлученной. Очевидно, что это обусловлено растворением при облучении стали частиц карбидов хрома субмикронных размеров, присутствующих в образцах в исходном состоянии, с последующим формированием нитридов хрома.

4. Заключение

Установлено, что облучение стали 20X23H18 импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя сопровождается формированием структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации с размером ячеек 330–500 нм. Показано, что азотирование предварительно облученной стали в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом приводит к существенному (на 39%) увеличению твердости относительно азотированной необлученной стали и многократному (в 9 раз) увеличению твердости относительно исходной стали. Показано, что азотирование стали 20X23H18 (не зависимо от предварительной обработки), позволяет повысить износостойкость материала в 100 и более раз. Установлено, что в стали, предварительно облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой азотированию, относительное содержание фазы CrN в 2.5 раза выше, чем в азотированной стали в необлученном состоянии. Высказано предположение, что это обусловлено растворением при облучении стали частиц карбидов хрома субмикронных размеров, присутствующих в образцах в исходном состоянии, с последующим формированием нитридов хрома в процессе азотирования.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700010.

5. Литература

- [1] Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А., *Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей*. (Москва: Техносфера, 2012).
- [2] Meletis E.I., *Surf. Coat. Technol.*, **149**(2–3), 95, 2002; doi: 10.1016/S0257-8972(01)01441-4
- [3] Wei R., Benn C.R., Cooper C.V., *Plasma Process. Polym.*, **4**(1), 700, 2007; doi: 10.1002/ppap.200731801
- [4] Chanin P.M., Koval N.N., Gocharenko I.M., Grigoriev S.V., *Physics and Chemistry of materials processing*, **3**, 16, 2001.
- [5] Коваль Н.Н., Иванова Ю.Ф., *Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки*. (Томск: Изд-во НТЛ, 2016).
- [6] Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., *Известия ВУЗов. Физика.*, **5**, 60, 2008.