

## ВЛИЯНИЕ ПРОКАТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ С ОБРАТИМЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ВОДОРОДОМ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 01X17H13M3

*Т.А. КОЗЛОВА, Е.В. МЕЛЬНИКОВ\*, Е.Г. АСТАФУРОВА, В.А. МОСКВИНА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

\*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

E-mail: Tati21@inbox.ru

## INFLUENCE OF ROLLING TEMPERATURE ON STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND MICROHARDNESS DEFORMATION OF AUSTENITIC CHROMIUM-NICKEL STEEL Fe-17Cr-14Ni-2Mo-0.01C

*T.A. KOZLOVA, E.V. MELNIKOV\*, E.G. ASTAFUROVA\*, V.A. MOSKVINA*

National Research Tomsk Polytechnic University

\*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

E-mail: Tati21@inbox.ru

*Annotation.* Rolling of steel Fe-17Cr-13Ni-3Mo-0.01C (in wt. %) provides a fragmentation of initial grain structure, formation of a high density of twin boundaries and increase in strength properties and formation  $\varepsilon$ -martensite. The plastic deformation does not lead to  $\alpha'$ -phase transformations in steel. Hydrogenation increase the density of twin boundaries in the structure.

**Введение.** В настоящее время во многих сферах человеческой деятельности сталь остается основным материалом, она находит применение в машиностроении, металлургии, самолетостроении, буровых установках, морских сооружениях и конструкциях. Поэтому вопрос исследования и улучшения механических, физических и технологических свойств сталей остается очень актуальным.

Для изменения свойств стали существуют такие методы как термическая и термомеханическая обработка, легирование, модификация поверхности, холодная деформация и др. Работа посвящена изучению структуры, фазового состава и механических свойств коррозионностойкой аустенитной стали 01X17H13M3, подвергнутой химико-деформационной обработке – многоходовой прокатке при комнатной температуре, комбинированной с легированием водородом.

**Материалы и методы исследования.** В качестве материала для исследования была выбрана коррозионностойкая аустенитная сталь 01X17H13M3. Образцы для испытаний вырезали на электроискровом станке в форме прямоугольных пластин с размерами  $15 \times 10 \times 1,5$  мм<sup>3</sup> из стали промышленной выплавки (закалка от 1100°C). Поврежденный при резке поверхностный слой на образцах удаляли химической чисткой в растворе: 2 части HNO<sub>3</sub> + 3 части HCl. Затем образцы подвергали механической шлифовке и электролитической полировке в растворе 25 гр CrO<sub>3</sub> + 210 мл H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

Образцы прокатывали до различных степеней обжатия ( $\varepsilon$ ) 25, 50, 75 и 90% с использованием вальцов настольных электромеханических В-51. Электролитическое насыщение образцов (пластины размером  $10 \times 15 \times 1$  мм) водородом проводили в 1N растворе серной кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) с добавлением тиомочевины (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S) при комнатной температуре и плотностях тока 10, 100, 200 мА/см<sup>2</sup>. Продолжительность наводороживания составляла 5 часов. Прочностные свойства (микротвердость) образцов изучали с помощью микротвердомера ПМТ-3 с механической нагрузкой

$P=200$ г. Одноосное статистическое растяжение проводили на испытательной машине Instron 3369 при комнатной температуре со скоростью  $4,2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Образцы для растяжения вырезали в форме двойных лопаток из предварительно прокатанных пластинок.

Зеренную и дефектную структуру изучали методом анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (ДОЭ) с использованием сканирующих электронных микроскопов Quanta 200 3D и Quanta 600 FEG при ускоряющем напряжении 30 кВ. Также использовали метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ). Образцы для электронно-микроскопических исследований готовили стандартными методами. Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучения.

**Результаты исследования.** На рисунке 1 приведены рентгенограммы для стали 01X17H13M3 после прокатки до  $\varepsilon=50\%$  (крив. 1) и после различных режимов наводороживания и прокатки до  $\varepsilon=50\%$  (крив. 2-4). На рентгенограммах наблюдаются рефлексы только от  $\gamma$ -фазы, т.е. прокатка, комбинированная с наводороживанием, не способствует появлению заметного количества  $\alpha'$  и  $\varepsilon$  мартенситных фаз. Однако  $\varepsilon$ -фазу наблюдали электронно-микроскопически (рис. 4). Интенсивность пиков уменьшается с наводороживанием, а ширина увеличивается, что говорит об измельчении структуры и росте внутренних напряжений.

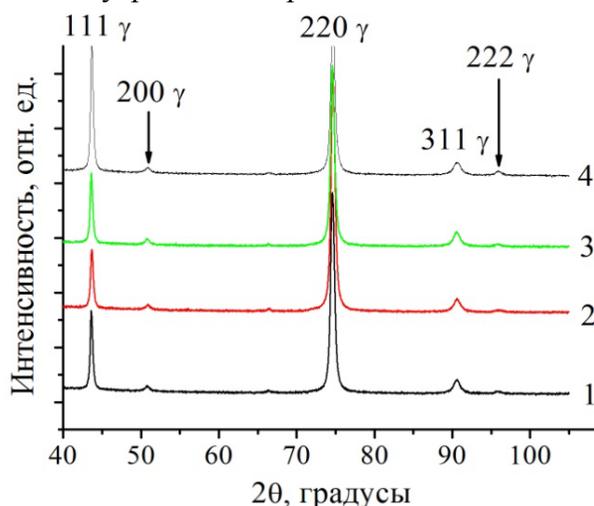


Рисунок 1 – Рентгенограммы для образцов стали 01X17H13M3 после прокатки ( $\varepsilon=50\%$ ), без водорода (1) и комбинированной с наводороживанием: 2)  $j=10 \text{ мА/см}^2$ ; 3)  $j=100 \text{ мА/см}^2$ ; 4)  $j=200 \text{ мА/см}^2$

Анализ ДОЭ–карт (рис. 2, рис. 3 а, б, в) и изображений, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 4), для образцов исследуемой стали после различных режимов электролитического насыщения водородом и прокатки до  $\varepsilon=25\text{--}50\%$  показал, что зеренная структура также измельчается до субмикронного масштаба и носит ориентированный характер (вдоль направления прокатки), наблюдаются двойники деформации (рис. 2-3).

С увеличением степени деформации  $\varepsilon > 50\%$  (рис. 3) происходит рост микронапряжений, поэтому дальнейшая идентификация полученных изображений методом ДОЭ затруднительна.

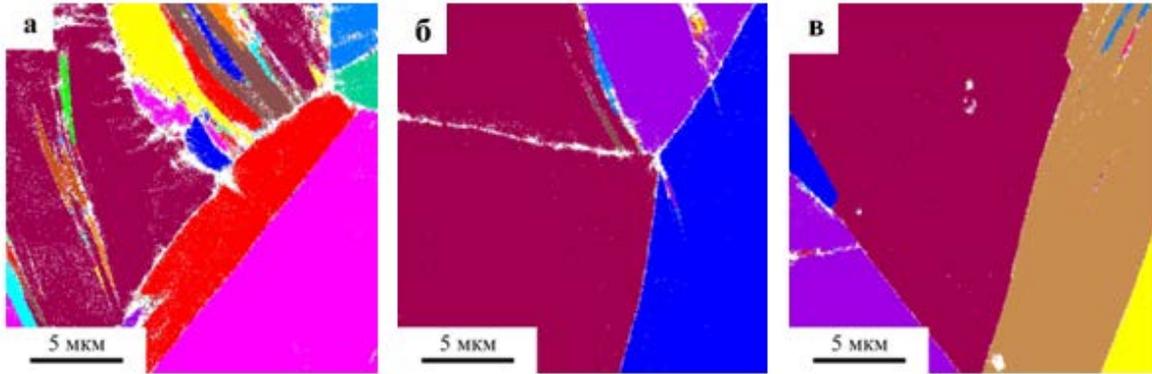


Рисунок 2 – Данные ДОЭ-анализа структуры стали 01X17H13M3 после прокатки ( $\epsilon=25\%$ ) – карта зерен: а)  $j=10\text{мА/см}^2$ ; б)  $j=100\text{мА/см}^2$ ; в)  $j=200\text{мА/см}^2$

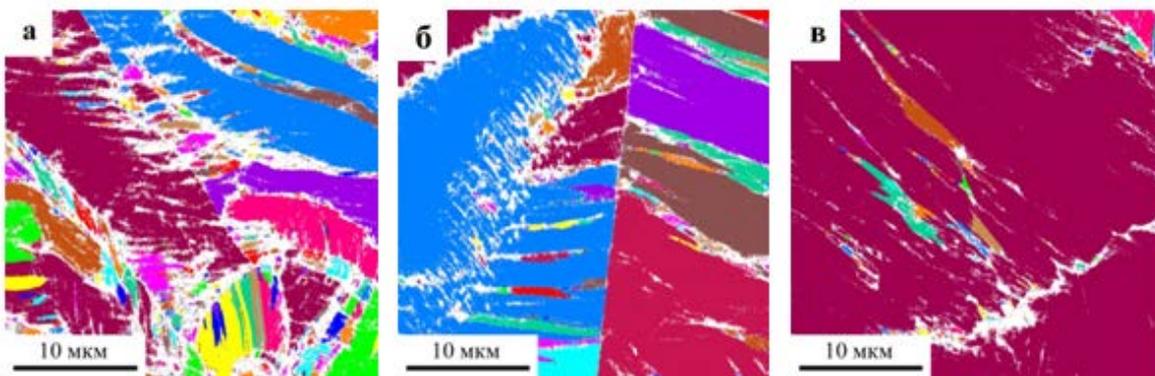


Рисунок 3 – Данные ДОЭ-анализа структуры стали 01X17H13M3 после прокатки ( $\epsilon=50\%$ ) – карта зерен: а)  $j=10\text{мА/см}^2$ ; б)  $j=100\text{мА/см}^2$ ; в)  $j=200\text{мА/см}^2$

Электронно-микроскопические изображения стали 01X17H13M3, представлены на рисунке 3 *а-е*. При деформации стали, как с водородом, так и без него наблюдаются дислокационное скольжение, двойники деформации и полосы локализованного течения. Полученные данные аналогичны изображениям, полученным для образцов после холодной прокатки без легирования водородом, но есть и некоторые различия. Рассмотрим каждое состояние отдельно.

1) Состояние после прокатки при комнатной температуре до степеней деформации 25% и 50% (рис. 4 *а, б*). Наблюдается полосовая структура, высокая плотность дислокаций, двойники деформации. Основными механизмами деформации являются дислокационное скольжение и двойникование (подробнее см. раздел 3.1).

2) Состояние для образцов стали, прокатанных до степеней деформации  $\epsilon=25\%$  (рис. 3.14 *д*) и  $\epsilon=50\%$  (рис. 4 *в, з*). Перед прокаткой образцы подвергались электролитическому насыщению водородом при плотности тока  $j=200\text{мА/см}^2$ . Наблюдали характерное уменьшение ширины двойниковых ламелей по сравнению с образцами стали, прокатанными без дополнительного легирования водородом, и увеличение плотности двойниковых границ для образца прокатанного до степени деформации  $\epsilon=50\%$  (табл. 3.10) по сравнению с образцами стали, прокатанными без легирования водородом и образцами, прокатанными до степени деформации  $\epsilon=25\%$  и наводороженными при плотности тока  $j=200\text{ мА/см}^2$ .

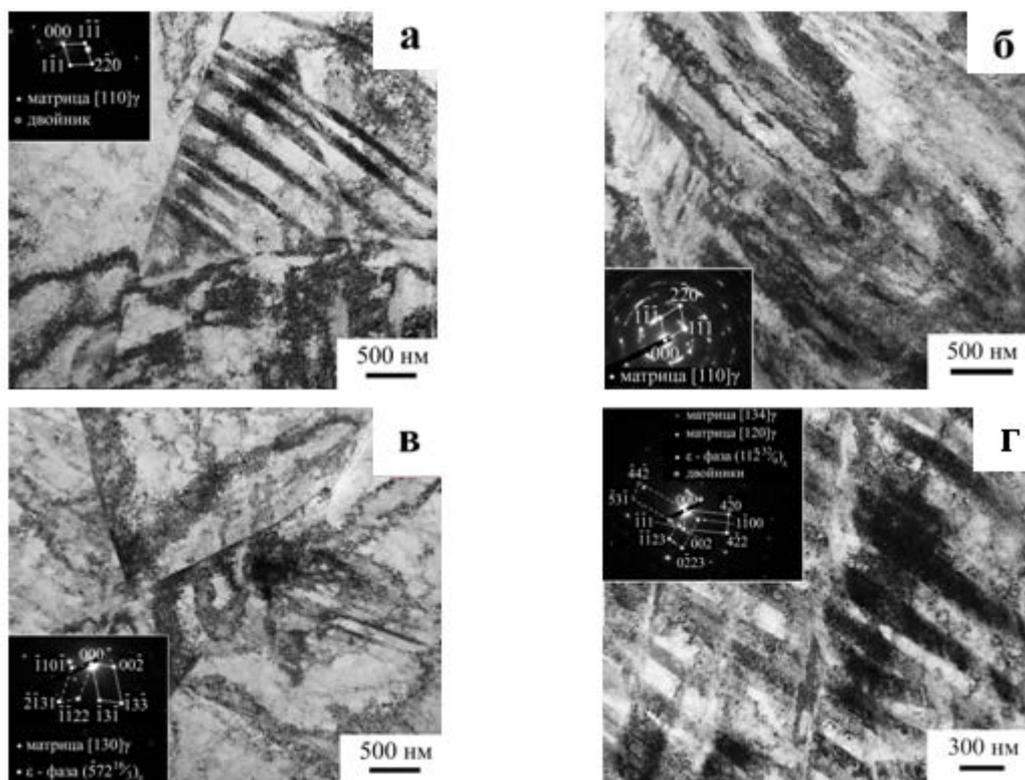


Рисунок 4 – Светлопольные электронно–микроскопические изображения, совмещенные с соответствующими микродифракционными картинами, для стали 01X17H13M3: а, в)  $\epsilon=25\%$ ; б, г)  $\epsilon=50\%$ ; а, б)  $j=10\text{мА/см}^2$ ; в, г)  $j=200\text{мА/см}^2$

**Заключение.** В работе изучали влияние прокатки, комбинированной с обратимым легированием водородом, при комнатной температуре на особенности структуры, фазовый состав, механизмы деформации и механические свойства аустенитной стали 01X17H13M3.

Было установлено, что после пластической деформации как с водородом, так и без него на рентгенограммах наблюдаются рефлекссы только от  $\gamma$ -фазы, т.е. сталь не испытывает при деформации фазовых переходов, а предварительное легирование водородом не приводит к появлению заметного количества  $\alpha'$  и  $\epsilon$ -мартенсита при прокатке.

Прокатка на плоских валках приводит к измельчению структуры. Основными механизмами деформации выступают: скольжение, механическое двойникование, формирование полос локализованного течения,  $\gamma$ - $\epsilon$  мартенситный переход. С увеличением степени пластической деформации доля двойниковых границ в структуре увеличивается. Предварительное легирование водородом способствуют увеличению плотности двойниковых границ и  $\gamma\epsilon$  фазовым переходам.

*Исследования выполнены с использованием оборудования Томского материаловедческого центра коллективного пользования и Центра коллективного пользования научным оборудованием БелГУ «Диагностика структуры и свойств наноматериалов». Работа выполнена при частичной финансовой поддержке стипендии Президента (СП-419.2015.1).*