

**ВЛИЯНИЕ ОТЖИГОВ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СТАЛИ 06МБФ ПОСЛЕ
КРУЧЕНИЯ НА НАКОВАЛЬНЯХ БРИДЖМЕНА**

Кошовкина В.С.¹, Мельников Е.В.², Москвина В.А.¹

Научные руководители: Астафурова Е.Г.², д.ф.-м.н., доцент, Майер Г.Г.², к.ф.-м.н.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

²ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

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

E-mail: koshovkina_vs@mail.ru

**THE INFLUENCE OF ANNEALINGS ON STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF
FE-MO-V-NB-C STEEL PROCESSED BY HIGH-PRESSURE TORSION**

V.S. Koshovkina¹, E.V. Melnikov², V.A. Moskvina¹

Scientific Supervisors: assistant professor, Dr. E.G. Astafurova², PhD G.G. Maier²

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

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

E-mail: koshovkina_vs@mail.ru

The influence of high-pressure torsion on microstructure, microhardness and thermal stability of low-carbon steel Fe-0,1Mo-0,6Mn-0,8Cr-0,2Ni-0,3Si-0,2Cu-0,1V-0,06Nb-0,09C, (wt.%) was investigated. It was shown that ultrafine-grained structure formed by high-pressure torsion possesses a high microhardness ($H\mu=7,0$ GPa) and high thermal stability up to the temperature of 400°C.

Современное развитие физики твердого тела и материаловедения имеет тенденцию к конструированию материалов с заданными физико-механическими свойствами. Одним из возможных путей получения материалов со специальными свойствами – создание в них ультрамелкозернистых (УМЗ) состояний методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Важной проблемой, стоящей на пути широкого практического использования УМЗ материалов, является проблема низкой термической стабильности их структуры. Поэтому одной из ключевых задач в исследовании УМЗ структур является поиск путей повышения их термической стабильности.

В качестве объекта исследования была выбрана низкоуглеродистая сталь 06МБФ (0,09 С, 0,32 Si, 0,63 Mn, 0,007 P, 0,004 S, 0,79 Cr, 0,20 Ni, 0,16 Cu, 0,08 Mo, 0,03 Al, 0,03 Ti, 0,03 Nb, 0,06 V, в мас. %) после нормализации при 920°C (30 мин.). Деформацию заготовок проводили под давлением 6 ГПа на наковальнях Бриджмена при комнатной температуре на 5 полных оборотов. Термическую стабильность, сформированного состояния исследовали после часовых отжигов в интервале температур 400–700°C.

Анализ микроструктуры проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа Technai G2 FEI и растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D с использованием метода анализа картин дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD-анализ). Рентгеновские исследования выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 с использованием Cu K α излучения. Расчет микроискажений кристаллической решетки и размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) осуществляли методом аппроксимации. Микротвердость измеряли по методу Виккерса с использованием микротвердомера Duramin 5 при нагрузке на индентор 200 г., время нагружения 10 сек. Среднее значение микротвердости вычисляли по измерениям, проведенным на середине радиуса диска.

Исследование исходной структуры стали 06МБФ показало, что нормализация приводит к формированию ферритно-бейнитного состояния со средним размером зерна феррита 10 мкм и объемной долей бейнита около 6 %. Значения плотности дислокаций составило $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$.

В результате кручения в наковальнях Бриджмена происходит интенсивное диспергирование структурных составляющих и формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (рис. 1 а, б).

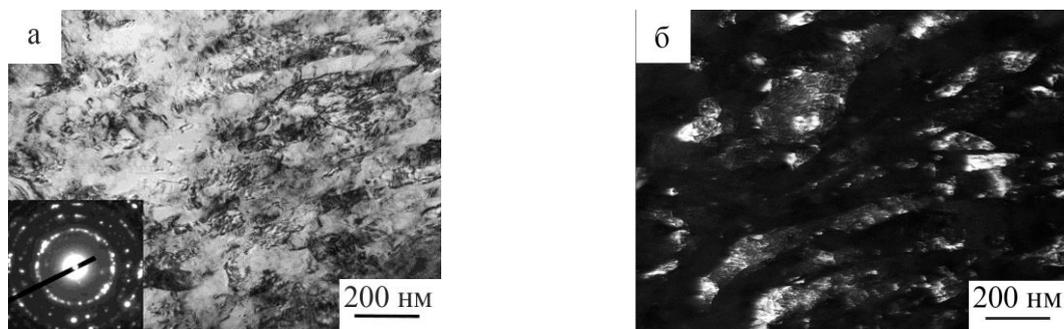


Рис.1. Электронно-микроскопические изображения структуры стали 06МБФ после КГД: а – светлоспольное изображение и микродифракционная картина; б – темнопольное изображение к (а), полученное в рефлексе α -Fe (микродифракционная картина снята с участка фольги площадью $S=0,95 \text{ мкм}^2$)

Характер распределения рефлексов по кольцу на микродифракционной картине свидетельствует о присутствии высокоугловых разориентировок между структурными элементами, а азимутальные размытия – о наличии малоугловых разориентировок и высоком уровне внутренних напряжений в зернах и субзернах после КГД (рис. 1 а, вклейка). После КГД на микродифракционных картинах также наблюдали сплошные диффузные кольца, свидетельствующие о наличии мелкоразмерных частиц в структуре. Анализ темнопольных изображений (рис. 1 б) показывает, что средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры, сформированной методом КГД, составляет $91 \pm 57 \text{ нм}$.

Изучение влияния отжигов на сформированную при КГД ультрамелкозернистую структуру, стали 06МБФ показало, что отжиг при 400°C не приводит к значительному росту элементов структуры, по-прежнему, наблюдаются диффузные кольца, указывающие на присутствие мелкоразмерных карбидов (рис. 2 а, б). Средний размер (суб)зерна, определенный по темнопольным электронно-микроскопическим изображениям, составляет $85 \pm 52 \text{ нм}$. После отжига при 500°C средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры возрастает до $152 \pm 81 \text{ нм}$ (рис. 2 в, г). А после отжигов при 600°C и 700°C структура стали трансформируется в мелкокристаллическую с размером зерна до $2,3 \pm 1,1 \text{ мкм}$ (рис. 2 д) и $5,4 \pm 4,1 \text{ мкм}$ соответственно.

Методом рентгеноструктурного анализа, установлено, что КГД вызывает уменьшение интенсивности и уширение рентгеновских линий. Область когерентного рассеяния (ОКР) уменьшается при КГД до 46 нм. Значения микродеформации кристаллической решетки $\Delta d/d$ при КГД исследуемой стали, напротив, увеличиваются на порядок от $\sim 10^{-4}$ в исходном состоянии до $\sim 10^{-3}$ после КГД, что свидетельствует о росте внутренних напряжениях в структуре после КГД. Отжиги приводят к релаксации структуры, уменьшению величины уширения рентгеновских линий, к росту ОКР (46 нм после отжига 400°C , 75 нм - при 500°C , 200 нм после отжигов при 600°C и 700°C), спаду значений микродеформации кристаллической решетки (до $0,5 \times 10^{-3}$ после отжига при 400°C , до $0,5 \times 10^{-4}$ - при 500°C , до $0,29 \times 10^{-4}$ – при 600°C и

до $0,2 \times 10^{-4}$ – при 700°C). Плотность дислокаций снизилась на порядок от $\sim 10^{11}$ см^{-2} после КГД до $\sim 10^{10}$ см^{-2} после отжигов.

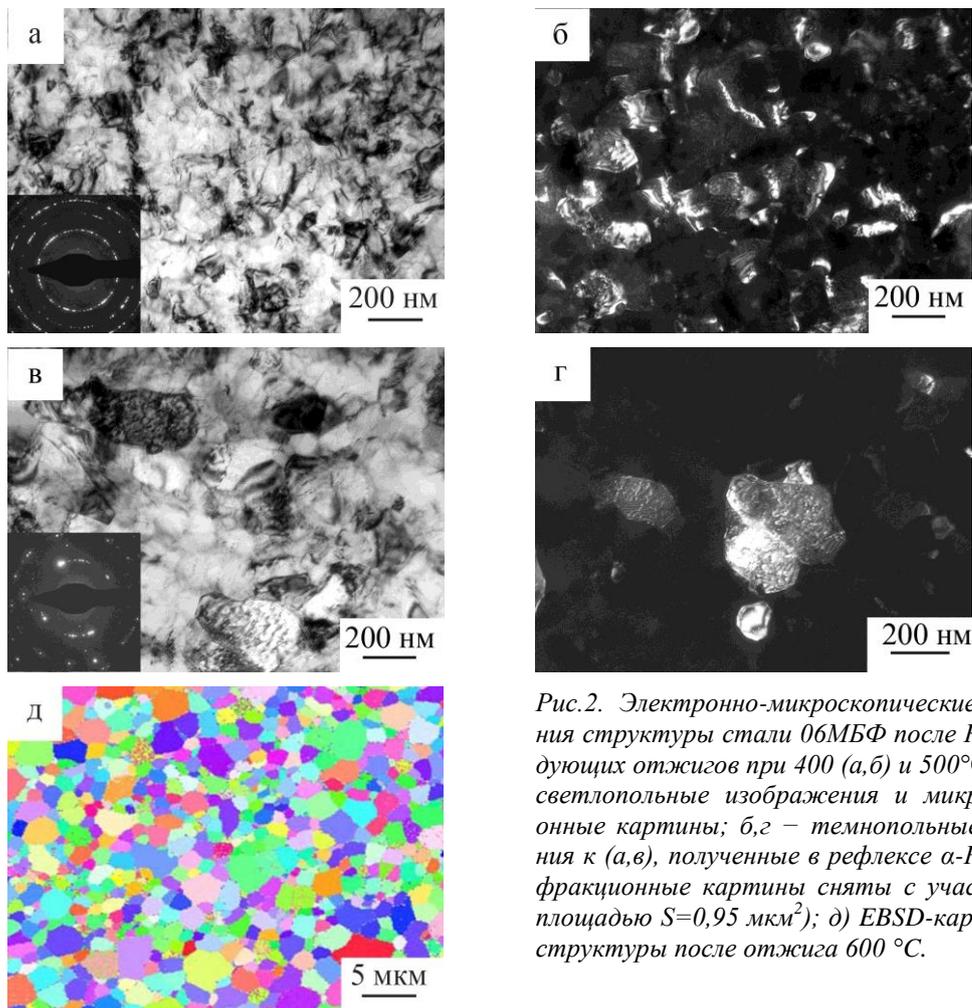


Рис.2. Электронно-микроскопические изображения структуры стали 06МБФ после КГД и последующих отжигов при 400°C (а,б) и 500°C (в,г): а,в – светлопольные изображения и микродифракционные картины; б,г – темнопольные изображения к (а,в), полученные в рефлексе $\alpha\text{-Fe}$ (микродифракционные картины сняты с участка фольги площадью $S=0,95$ $\mu\text{м}^2$); д) EBSD-карта зеренной структуры после отжига 600°C .

Изучение эволюции значений микротвердости стали 06МБФ показало, что КГД приводит к повышению средних значений микротвердости в сравнении с исходным состоянием: от 1,6 ГПа до 7,0 ГПа. После отжига при температуре 400°C в стали происходит незначительное повышение значения микротвердости до 7,3 ГПа. Последующее увеличение температуры отжига до 500°C сопровождается спадом значений микротвердости до 5,4 ГПа и по достижении температуры 700°C значения микротвердости приближаются к значению для исходного состояния (3,3 ГПа).

Таким образом, исследование стали 06МБФ, после кручения под давлением и отжигов показало, что ультрамелкозернистый характер структуры (средний размер структурных элементов 91 нм) и высокие значения микротвердости ($H_c=7,0$ ГПа) сохраняются вплоть до температуры отжига 400°C . Высокая термическая стабильность сформированной при КГД структуры в стали 06МБФ обусловлена, в первую очередь, дисперсионным твердением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН на 2013-2016 гг. (проект П.23.2.2.) и стипендии Президента РФ (СП-4682.2013.1).