

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СОСТОЯНИЯ,
СФОРМИРОВАННОГО В СТАЛИ 06МБФ МЕТОДОМ ТЕПЛОГО КРУЧЕНИЯ
ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

В.С. Кошовкина, Г.Г. Майер, Г.В. Хомякова

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: koshovkina_vs@mail.ru

**THERMAL STABILITY OF ULTRAFINE-GRAINED STATE FORMED IN Fe-Mo-V-Nb-C STEEL BY
WARM HIGH-PRESSURE TORSION**

V.S. Koshovkina, G.G. Maier, G.V. Chomyakova

Scientific Supervisor: assistant professor, Dr. E.G. Astafurova

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

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk,

pr.Akademicheskii,2/4,634021

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: koshovkina_vs@mail.ru

The influence of warm 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 ($H\mu=5,7$ GPa) and high thermal stability up to the temperature of 500°C.

В качестве объекта исследования была выбрана низкоуглеродистая сталь 06МБФ (Fe-0,1Mo-0,6Mn-0,8Cr-0,2Ni-0,3Si-0,2Cu-0,1V-0,06Nb-0,09C, мас.%). Исходные заготовки закаливали от 920 °С (30 мин.), затем отпускали при температуре 670°С (1 час). Деформацию стали проводили под давлением 4 ГПа на наковальнях Бриджмена при T=450 °С на пять полных оборотов. После КГД получали диски диаметром 10 мм и толщиной 0,26 мм. Затем образцы подвергали отжигам в интервале температур 500÷700°С (1 ч.).

Микроструктурные исследования проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Technai G2 FEI при ускоряющем напряжении 200 кВ и растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D с использованием метода анализа картин дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD-анализ). Средний размер структурных элементов определяли методом секущих по электронно-микроскопическим снимкам. Для измерения микротвердости использовали микротвердомер Duramin 5 с нагрузкой на индентор P=200 г. Среднее значение микротвердости вычисляли по измерениям, проведенным на середине радиуса диска.

Исходная структура стали состояла из полиэдрического феррита с размером зерна 2,4 мкм и пластинчатого феррита с толщиной пластин $\sim 0,4$ мкм [1].

Показано, что КГД приводит к формированию ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в исследуемой стали. Микродифракционные картины (электроннограммы) после КГД носят кольцевой характер. На кольцах различимы отдельные рефлексы, их равномерное распределение по кольцу и наличие азимутальных размывов свидетельствуют о наличии высоко- и малоугловых разориентировок между структурными элементами, с которых получены электронограммы. Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры, рассчитанный на основе анализа темнопольных электронно-микроскопических изображений, составляет 120 нм.

Методом ПЭМ обнаружены карбиды цементитного типа разной дисперсности (15–90 нм в исходном состоянии и < 5 нм после КГД) на границах и внутри элементов структуры, их расположение в структуре квазиоднородно. Отжиг при температуре 500°C не вызывает роста элементов структуры, но приводит к ее частичной релаксации, наблюдается большое количество зерен с равновесными большеугловыми границами (рис.1 а,б).

Средний размер (суб)зерна, определенный по темнопольным электронно-микроскопическим изображениям, составляет 120 нм. После отжига при 600°C средний размер элементов зеренно-

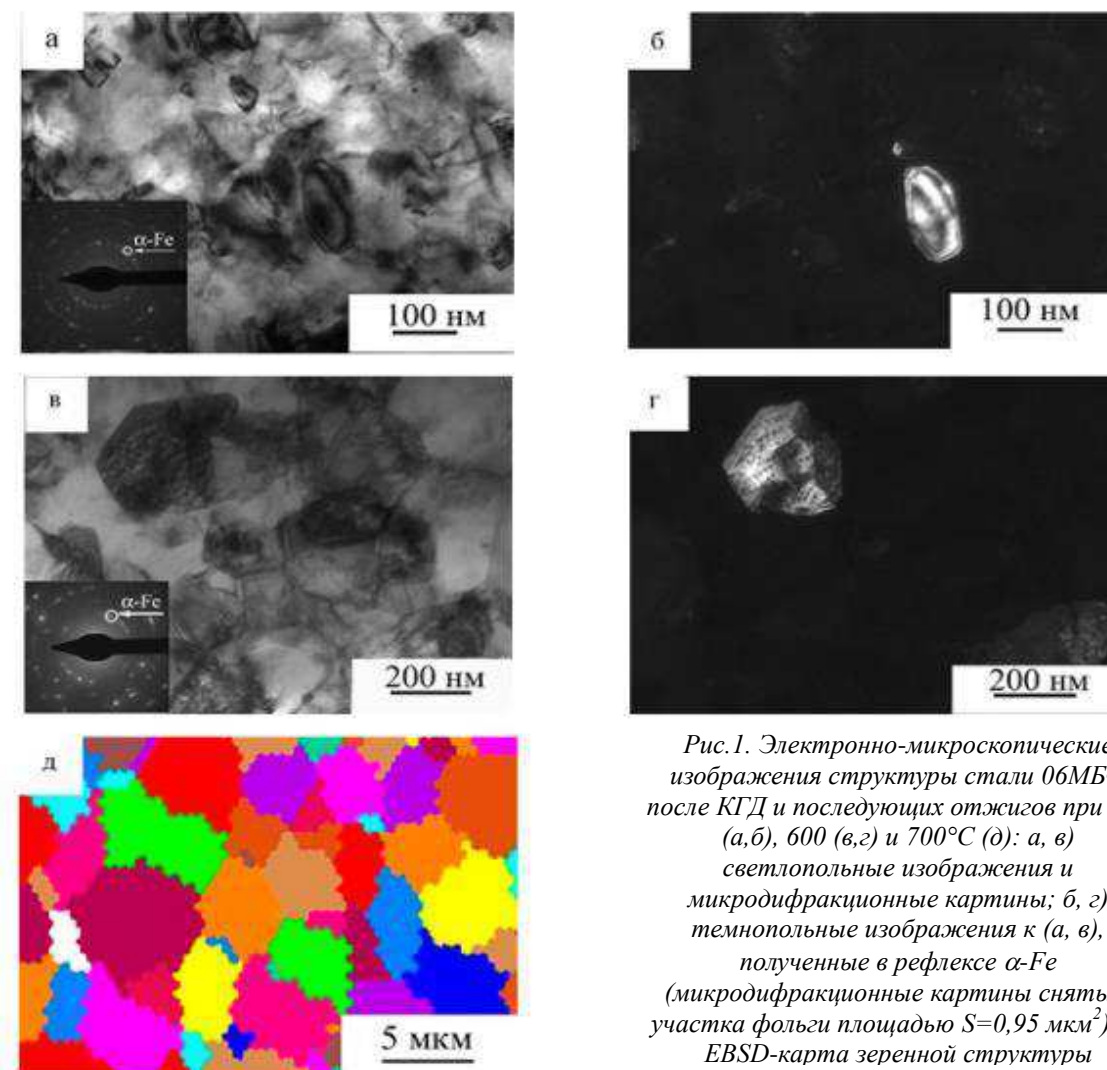


Рис.1. Электронно-микроскопические изображения структуры стали 06МБФ после КГД и последующих отжигов при 500 (а,б), 600 (в,г) и 700°C (д): а, в) светлопольные изображения и микродифракционные картины; б, г) темнопольные изображения к (а, в), полученные в рефлексе α -Fe (микродифракционные картины сняты с участка фольги площадью $S=0,95$ мкм²), д) EBSD-карта зеренной структуры

субзеренной структуры возрастает до 290 нм (Рис. 1 в, г). А после отжига при 700°C структура стали трансформируется в мелкокристаллическую с размером зерна более 4 мкм (Рис. 1 д). Наряду с ростом элементов зеренно-субзеренной структуры наблюдали увеличение размеров карбидов.

Изучение эволюции значений микротвердости при отжигах показало, что вплоть до температуры 500°C сохраняются высокие значения микротвердости ($H_{\mu}=5,7$ ГПа), сформированные в стали при КГД

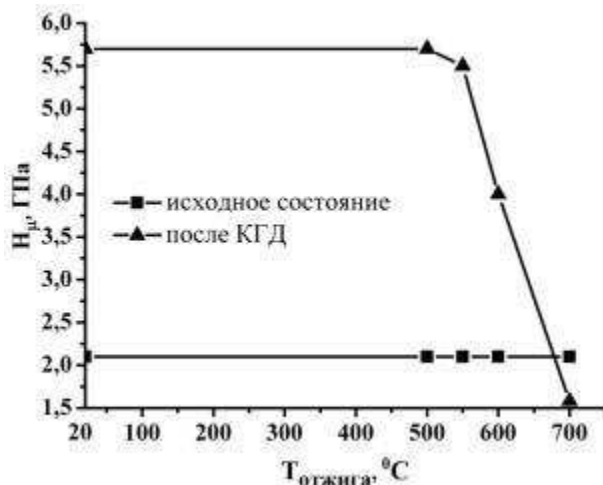


Рис.2. Зависимость значений микротвердости стали 06МБФ в исходном состоянии и после КГД от температуры отжига

(Рис. 2). Последующее увеличение температуры отжига до 600°C сопровождается спадом значений микротвердости, и по достижении температуры 700°C значения микротвердости приближаются к значению для исходного состояния.

Таким образом, исследование низкоуглеродистой стали 06МБФ после КГД и отжигов показало, что ультрамелкозернистый характер структуры (средний размер структурных элементов 120 нм) и высокие значения микротвердости ($H_{\mu}=5,7$ ГПа) сохраняются

вплоть до температуры отжига 500°C (1 ч). Высокая термическая стабильность сформированной при КГД структуры в стали 06МБФ обусловлена, в первую очередь, карбидным упрочнением.

Авторы выражают благодарность профессору Добаткину С.В., д.т.н. Одесскому П.Д., д.ф.-м.н. Найденкину Е.В. за помощь в организации исследований. Исследование проведено на оборудовании Томского материаловедческого центра коллективного пользования и Новосибирского государственного технического университета.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке стипендии Президента РФ (СП-4682.2013.1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафурова Е.Г., Майер Г.Г., Тукеева М.С., и др. Влияние кручения под квазигидростатическим давлением на структуру, механические свойства и термическую стабильность низко- и высокоуглеродистых сталей// Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – №12/2. – С. 76–81.