

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ
СОСТОЯНИЕ СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ ОТПУЩЕННОГО МАРТЕНСИТА**

А.В. Никоненко¹, Н.А. Попова², Е.Л. Никоненко², Н.А. Конева²

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Н.А. Конева²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,

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

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,

Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003

E-mail: aliska-nik@mail.ru

**STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF TEMPERED MARTENSITE STEEL
AFFECTED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION**

A.V. Nikonenko¹, N.A. Popova², E.L. Nikonenko², N.A. Koneva²

Scientific Supervisor: Prof. Dr. N.A. Koneva²

¹Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

²Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Solyanaya sq., 2, 634003

E-mail: aliska-nik@mail.ru

***Abstract.** The paper presents the transmission electron microscopy investigations of the structure and phase composition of the type 0,6C-1Mo-1V-1Nb tempered martensite steel modified by the equal channel angular pressing. It is shown that ECAP affects the morphology and phase composition of the steel. Investigations covered the defect structure, dislocation density and internal stresses.*

Введение. Низкоуглеродистые стали являются основным классом конструкционных материалов. Однако в исходном крупнокристаллическом состоянии они имеют низкие прочностные характеристики. Поэтому формирование в этих сталях структур, обеспечивающих высокий комплекс механических свойств, имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Повышение механических характеристик путем применения различных видов термической обработки подробно изучено. В последнее время все больше внимания уделяется получению ультрамелкозернистых и нанокристаллических состояний методом интенсивной пластической деформации (ИПД), что позволит значительно расширить область применения сталей благодаря достижению повышенных прочностных свойств. Несмотря на значительные успехи в исследовании процессов измельчения зерна и эволюции структуры различных пластичных материалов при ИПД, комплексное действие механизмов упрочнения сталей после ИПД изучено недостаточно.

Целью настоящей работы являлось исследование структурно-фазового состояния конструкционной стали 06МФБ со структурой отпущенного мартенсита после равноканального углового прессования (РКУП).

Материал и методы исследования. Материалом исследования служила низкоуглеродистая сталь 06МФБ (0,06 % С; ~1 % Мо; ~1 % Nb; ~1 % V) с исходной структурой отпущенного мартенсита. Сталь деформировалась методом РКУП. При РКУП образцы подвергались сдвиговой деформации путём

сжатия по двум пересекающимся под углом $\Phi = 120^\circ$ каналам равного диаметра при температуре 400°C без промежуточных отжигов. Число проходов соответствовало $N = 6$. Эквивалентная деформация, реализуемая в результате РКУП, $\varepsilon = 4$.

Исследования проведены методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием электронного микроскопа ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне электронного микроскопа составляло 25000 крат. Изучение структуры и фазового состава стали проводилось на фольгах.

Полученные результаты. Структура матрицы стали в исходном состоянии представлена двумя морфологическими составляющими: 1) отпущенный мартенсит (рис.1а) и 2) зерна α -фазы, не унаследовавшие структуру мартенситного превращения (рис.1б). Размеры α -зерен ~ 5 мкм. Объемная доля первой морфологической составляющей $\sim 0,6$, второй – $\sim 0,4$.

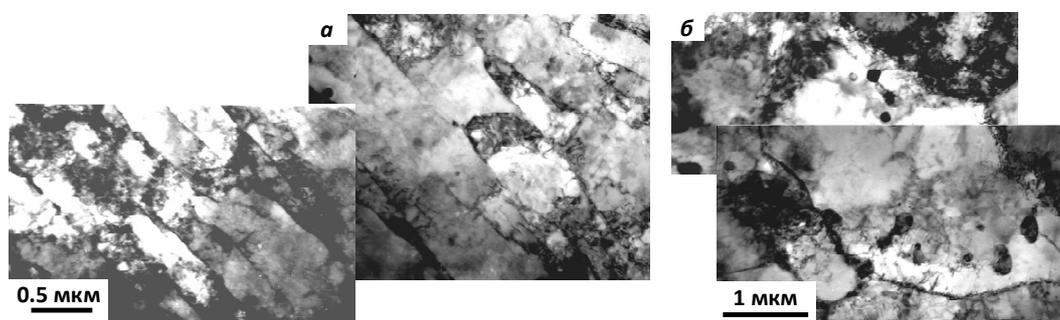


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 06МФБ в исходном состоянии: а – пакетный мартенсит, б – α -зерно

В обоих морфологических составляющих присутствует карбидная фаза. Согласно дифракционному анализу, в стали присутствует только одна модификация карбида – карбид $(V, Mo, Nb)_2C$, обладающий орторомбической кристаллической решеткой. Установлено, что карбидная фаза в α -зернах присутствует как внутри, так и по границам зерен, в пакетном мартенсите – только по границам мартенситных реек. Все частицы, независимо от мест расположения, обладают округлой формой. В области зерен α -фазы средний размер карбидных частиц составляет ~ 100 нм, их объемная доля – 2,5%. В структуре отпущенного мартенсита размер частиц меньше (~ 30 нм), объемная доля их также меньше (0,5%).

Скалярная плотность дислокаций в структуре пакетного мартенсита составляет величину $5,6 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$, в зернах α -фазы – $1,5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. И в мартенситных рейках, и в α -зернах присутствует избыточная плотность дислокаций, что сопровождается возникновением локальных полей напряжений. Их наличие проявляется в присутствии изгибных экстинкционных контуров. Избыточная плотность дислокаций в мартенситных рейках составляет величину $3,9 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$, в α -зернах и – $1,5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Сопоставление скалярной и избыточной плотностей дислокаций показывает, что в исходном состоянии стали дислокационная структура сильно поляризована. Поляризация дислокационной структуры привела к локальным внутренним (дальнедействующим) напряжениям: в мартенситных рейках их величин 390 МПа, в α -зернах – 410 МПа. Несмотря на то, что значение скалярной плотности дислокаций меньше

в α -зернах, локальные поля в них сравнимы с локальными полями в пакетном мартенсите. Это объясняется более высокой поляризованностью дислокационной структуры в α -зернах.

Деформация методом РКУП привела к значительным изменениям матрицы стали. Структура пакетного мартенсита сохранила свои главные черты – параллельность границ мартенситных реек. Однако теперь она значительно фрагментирована (рис.2а). Средний размер фрагментов $0,3 \times 0,8$ мкм. Со структурой α -зерен произошли также большие изменения: внутри зерен α -фазы сформировалась структура с непрерывными и дискретными разориентировками (рис.2б), размер зерен уменьшился почти на порядок (0,6 мкм).

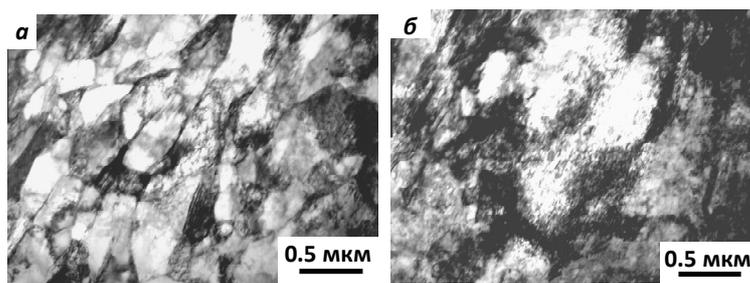


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 06МФБ после РКУП: а – пакетный мартенсит, б – α -зерна

Как и в исходном состоянии, в обоих морфологических составляющих присутствует карбидная фаза – карбид $(V, Mo, Nb)_2C$. Однако теперь карбидные частицы присутствуют как внутри (на дислокациях), так и на границах обеих морфологических составляющих матрицы стали. На дислокациях частицы обладают округлой формой. Их средний размер в пакетном мартенсите составляет 10 нм, в α -зернах частицы крупнее (30 нм), но в 4 раза меньше, чем в исходном состоянии. Объемная доля частиц в пакетном мартенсите составляет 0,2%, в α -зернах – 0,1%. Таким образом, РКУП привело к образованию карбидов в пакетной составляющей матрицы стали и к измельчению и растворению карбидов, находящихся внутри зерен α -фазы.

Под действием РКУП изменились не только размеры карбидных частиц, расположенных на границах морфологических составляющих, но и их форма. Теперь частицы имеют пластинчатую форму: на границах реек они более тонкие и вытянутые (20×120 нм), на границах зерен α -фазы их средний размер 40×80 нм. Однако объемная доля карбидов в пакетном мартенсите по сравнению с исходным состоянием не изменилась (0,5%), в зернах α -фазы – несколько уменьшилась (1%).

Деформация методом РКУП привела к незначительному уменьшению величины скалярной плотности дислокаций в реечной структуре и резкому увеличению в α -зернах. Дислокационная структура во всем материале полностью поляризована. Локальные внутренние напряжения в реечной структуре превышают 1000 МПа, в α -зернах они достигают 900 МПа.

Закключение. Проведенные методом ПЭМ исследования показали, что РКУП стали 06МФБ ведет, во-первых, к измельчению фрагментированной и зеренной структуры. Во-вторых, не изменяет типа карбидной фазы, но приводит к разрушению и частичному растворению карбидных частиц.

Работа выполнена при поддержке государственного задания на проведение научных исследований по проекту №3.8320.2017/БЧ