

УДК 620.192.4

**А.В. Романов**

**A.V. Romanov**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

## **НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЙ МАРТЕНСИТ В КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ**

### **LOW-CARBON MARTENSITE IN STRUCTURAL STEELS**

Рассмотрены основные типы мартенсита в низкоуглеродистых мартенситных сталях и описаны особенности каждого из них. Подробно описан пакетный мартенсит, являющийся основой средне- и низкоуглеродистых сталей.

**Ключевые слова:** мартенсит пластинчатый и реечный, низкоуглеродистая сталь, закалка, аустенит.

The article considers the main types of martensite in low-carbon martensite steels and describes the features of each from them. Batch martensite is described in detail, which is the basis of the medium- and low-carbon steels.

**Keywords:** plate and rack-and-pinion martensite, low-carbon steel, quench, austenite.

В настоящее время материалы со структурой низкоуглеродистого мартенсита являются востребованными из-за обеспечения ими высокого комплекса свойств и хорошего отношения цена/качество.

Структура мартенсита – это зерна игольчатой и/или реечной формы в микроструктуре металла, которые представляют собой перенасыщенный твердый раствор углерода в альфа-железе [1]. Мартенситная структура является характерной для сталей, прошедших так называемую процедуру закалки, а также для некоторых сплавов и чистых металлов, обладающих полиморфизмом.

Мартенсит может быть в сталях, а также в разных видах. Основные из них [2]:

1. Пластинчатый (двойниковый) мартенсит. Его образование происходит при температуре начала мартенситного превращения ниже 200 °С. Образовавшиеся мартенситные пластины имеют среднюю линию повышенной травимости, которая называется мидрибом. Мидриб состоит из большого числа двойников по плоскостям, толщина которых составляет 5–30 нм.

2. Реечный (пакетный) мартенсит. Температура начала мартенситного превращения для данного вида мартенсита выше  $300^{\circ}\text{C}$ . В данном случае кристаллы мартенсита представлены в виде тонких реек толщиной  $0,2\text{--}2\text{ мкм}$ , вытянутых в одном направлении. Сосредоточение параллельных друг другу реек образует пакеты. Между собой данные рейки разделены тонкими прослойками остаточного аустенита толщиной  $10\text{--}20\text{ нм}$ .

Вышеперечисленные виды мартенсита отличаются друг от друга прежде всего тем, что их образование обусловлено различной температурой, которая зависит непосредственно от состава сплава и других факторов. Так, низкая прочность аустенита при высокой температуре способствует образованию реечного мартенсита, а с понижением температуры, когда прочность аустенита выше, увеличивается доля пластинчатого мартенсита. Кроме того, реечный мартенсит имеет повышенную релаксационную способность, чего нет у пластинчатого вида мартенсита.

Стоит отметить, что мартенсит только реечного типа образуется в низкоуглеродистых мартенситных сталях (НМС), где отсутствует остаточный аустенит. Температура начала мартенситного превращения у таких сталей порядка  $400^{\circ}\text{C}$  [3]. По своим свойствам низкоуглеродистый пакетный мартенсит подходит для применения в качестве одного из лучших конструкционных материалов.

Низкоуглеродистые мартенситные стали имеют высокую устойчивость переохлажденного аустенита как в области нормального, так и промежуточного превращения. На рис. 1 представлена исходная структура низкоуглеродистой мартенситной стали 15X2Г2НМФБА (средний размер зерна  $45\text{ мкм}$ .)

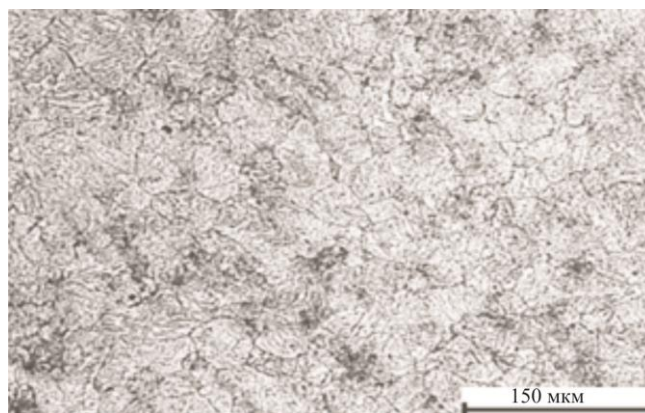


Рис. 1. Исходная структура исследуемой стали

Охлаждение низкоуглеродистой мартенситной стали на воздухе непосредственно с температуры конца горячей деформации обеспечивает высокий комплекс механических свойств.

После закалки, независимо от охлаждающей среды, структура стали включает главным образом пакетный мартенсит. Повышенная плотность дислокаций в пакетном мартенсите и дисперсность характерных элементов структуры – реек – обуславливают высокий уровень прочности, а подвижность дислокаций – пластичность и релаксационную способность.

Микроструктура низкоуглеродистой мартенситной стали 07ХЗГНМ после изотермической выдержки при температуре 360 °С представлена на рис. 2.

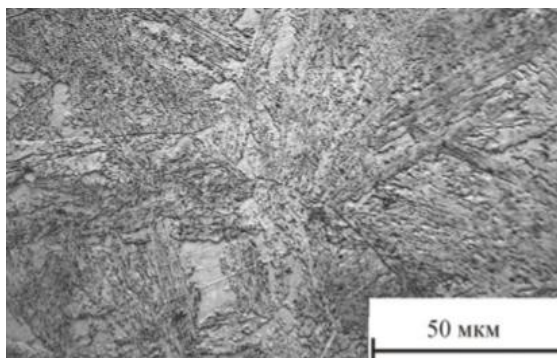


Рис. 2. Микроструктура стали 07ХЗГНМ после изотермической выдержки

Структура реечного мартенсита, формирующаяся после закалки низкоуглеродистой мартенситной стали, представляет собой набор параллельных друг другу кристаллов, имеющих форму трехосного эллипсоида (рис. 3) [3].

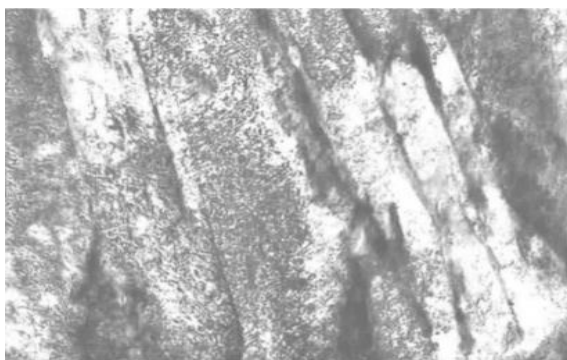


Рис. 3. Тонкая структура низкоуглеродистой мартенситной стали 15Х2Г2НМФБА

С уменьшением скорости охлаждения заготовок послековки наблюдается падение прочностных характеристик (таблица).

### Зависимость прочностных характеристик от скорости охлаждения

| Среда охлаждения/скорость охлаждения, °С/с | Прочностные характеристики |                  |              |            |   |
|--|----------------------------|------------------|--------------|------------|---|
|  | $\sigma_{0,2}$ , МПа       | $\sigma_b$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | KCV <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup> |
| Вода/600                                   | 1131                       | 1424             | 16,2         | 62         | 80                                      |
| Воздух/3                                   | 1015                       | 1338             | 17,2         | 65         | 83                                      |
| Печь/0,015                                 | 950                        | 1284             | 18           | 59         | 123                                     |

Так, разница между пределом прочности после водного охлаждения и пределом прочности после печного охлаждения составляет всего 140 МПа, в то время как ударная вязкость, определенная на образцах с V-образным концентратором, увеличивается на 43 Дж/см<sup>2</sup> (в 1,5 раза) [4].

Скорость охлажденияковки существенным образом влияет на размер зерна стали. На рис. 4–6 представлены микроструктуры пакетного мартенсита заготовок, охлажденных послековки с различными скоростями.

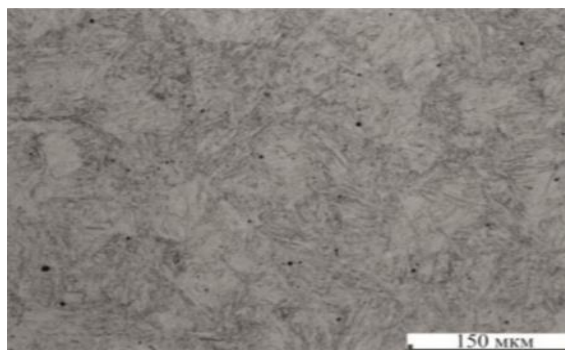


Рис. 4. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в воде

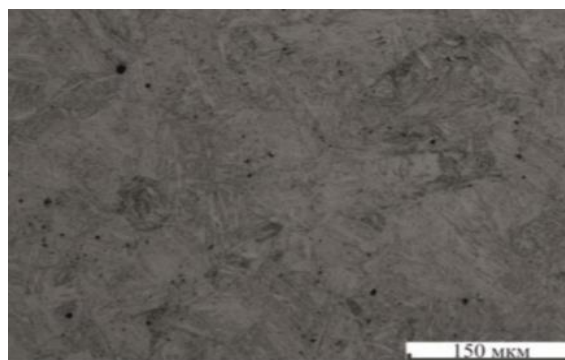


Рис. 5. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации на воздухе

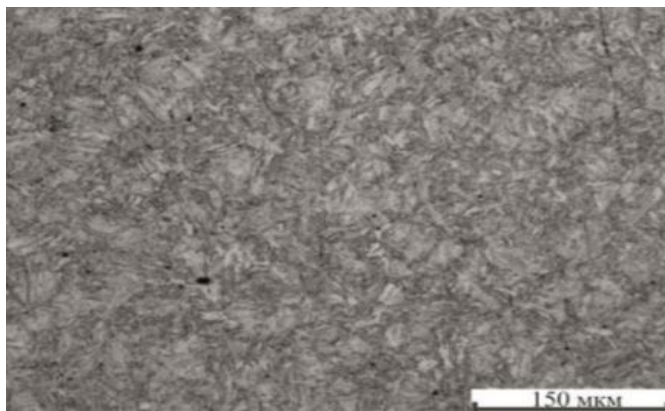


Рис. 6. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в печи

Как видно из соотношения скорости охлаждения и величины зерна (см. рис. 4–6), с уменьшением скорости охлаждения происходит измельчение зёрненной структуры материала. Так, после охлаждения с печью размер зерна аустенита составил 17 мкм. Измельчение зёрненной структуры при медленном охлаждении прежде всего связано с протеканием процессов рекристаллизации в широких температурных интервалах, которые были подавлены в случае охлаждения заготовки после горячей деформации в воде.

Высокая прочность в сочетании с высокой ударной вязкостью в широком интервале скоростей охлаждения обусловлены особенностями структуры речного мартенсита и отсутствием продуктов промежуточного превращения благодаря высокой устойчивости переохлажденного аустенита.

Таким образом, низкоуглеродистая мартенситная сталь благодаря структуре пакетного мартенсита обладает рядом уникальных свойств, таких как: высокая прокаливаемость при охлаждении на воздухе, отсутствие склонности к деформации и короблению, отсутствие обезуглероживания, хорошая свариваемость в термоупрочненном и нетермоупрочненном состояниях, закаливаемость при охлаждении на воздухе и др. В настоящее время НМС со структурой пакетного мартенсита нашли применение более чем в 40 объектах новой техники.

### Список литературы

1. Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С.С. Югай, Л.М. Клейнер, А.А. Шацов, Н.Н. Митрохович // МиТОМ. – 2004. – № 12. – С. 24–29.

2. Клейнер Л.М., Шацов А.А. Нанокристаллическая структура низкоуглеродистого реечного мартенсита и конструкционная прочность // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 72–75.

3. Формирование структуры и свойств низкоуглеродистой мартенситной стали 12Х2Г2НМФТ при закалке / С.С. Югай, Л.М. Клейнер, А.А. Шацов, Н.Н. Митрохович // ФММ. – 2004. – Т. 97, № 1. – С. 107–112.

4. Фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистых мартенситных сталях / Л.М. Клейнер, Д.М. Ларинин, Л.В. Спивак, А.А. Шацов // ФММ. – 2009. – Т. 108, № 2. – С. 161–168.

Получено 28.08.2020

**Романов Андрей Вячеславович** – магистрант, гр. МТО-19-1м, механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: romanov7official@yandex.ru.