

УДК 669.017:669.14

И.В. Ряпосов, Л.М. Клейнер, А.А. Шацов, П.А. Закревская

**СТРОЕНИЕ РЕЕЧНОГО МАРТЕНСИТА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ
НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ 15X2Г2НМФБ**

Пермский государственный технический университет

Аннотация: изучены особенности пакетно-реечного мартенсита низкоуглеродистой мартенситной стали (НМС) после охлаждения с прокатного нагрева. Установлено, что распределение реек по ширине описывается логарифмически нормальным законом. Дано статистическое описание тонкой структуры НМС.

Ключевые слова: низкоуглеродистый мартенсит, рейки, пакеты, фрагменты, ячейки, карбиды.

Введение

В начале второй половины XX века было обнаружено «восстановление» предела текучести и твердости деформированных металлов при «непрерывном отжиге», обусловленное образованием ячеистой структуры [1]. При отжиге количество дислокаций внутри ячеек уменьшалось, поэтому предположение об определяющей роли плотности дислокаций, а не размера ячейки не всегда обоснованно. С.Г. Болл на сплавах алюминия впервые показал выполнение соотношения петчевского вида между размером ячеек и пределом текучести. Позже Д.Г. Уорингтон на железе экспериментально доказал выполнение соотношения подобного уравнению Холла–Петча между пределом текучести и размером субзерен (ячеек). На основании работ перечисленных авторов и др. Р.У. Кан сделал заключение о том, что прочность материалов с ячеистой субструктурой определяют плоские скопления и стенки дислокаций, если только между ячейками не слишком малые углы разориентировки.

У материалов с пакетной структурой вклад в прочность границ реек на 1–2 порядка выше, чем границ пакетов, имеющих большеугловые границы [2], поэтому фрагментирование реек должно существенно повлиять на свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей (НМС).

Цель работы

Изучение строения низкоуглеродистого мартенсита горячекатаной НМС марки 15X2Г2НМФБ с пределом прочности σ_b - более 1400 МПа, пределом текучести $\sigma_{0,2}$ - более 1100 МПа, ударной вязкостью KCV - более 0,8 МДж/м².

Результаты и их обсуждение

Исследованная сталь, кроме традиционного для НМС легирования, содержит сильные карбидообразующие элементы (табл. 1); критические температуры, средний размер зерна аустенита и твердость в горячекатаном состоянии представлены в табл. 2.

Определенное сочетание углерода и легирующих элементов НМС обеспечивает высокую устойчивость переохлажденного аустенита и большую прокаливаемость, а легирование стали 15X2Г2НМФБ сильными карбидообразующими элементами (ванадием и ниобием) позволяет сохранить при нагреве мелкое зерно и увеличить отпускостойчивость.

Для изучения структуры использовали образцы диаметром 19 мм высотой 10 мм из прутков горячекатаной стали 15X2Г2НМФ.

Тонкую структуру и морфологию фаз изучали при помощи просвечивающей и растворовой электронной микроскопии.

Для просвечивающей микроскопии использовали фольги, полученные методом электрополировки. Образцы предварительно нарезали электроэрозионным станком на пластины размером 10x4 мм толщиной 0,2–0,3 мм. Далее проводили двухстороннее утонение на

наждачных бумагах до толщины 0,05–0,06 мм. Электрополировку проводили при температурах близких к 0 °С, в электролите состава 80 % ледяной уксусной кислоты, 20% хлорной кислоты [6]. Тонкую структуру просматривали на микроскопах JEM 200СХ и СМ 30 при ускоряющем напряжении до 200 кВ.

Таблица 1

Химический состав стали 15Х2Г2НМФБ

Содержание элементов, % (по массе)									
С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	S	P
0,15	0,25	1,87	1,92	1,07	0,46	0,14	0,16	0,008	0,011

Таблица 2

Критические температуры (°С), размер исходного зерна аустенита и твердость НМС 15Х2Г2НМФБ

A _{C1}	A _{C3}	Mn	M _к	Размер зерна <i>d</i> ср., мкм	Твердость, HRC
710	840	340	170	13	42

Растровое изображение полированных и травленных в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты образцов получали на микроскопах Hitachi s-3400N, FEI (Philips).

В качестве закона распределения по размеру ширины рейки выбран логнормальный закон:

$$f = \exp\left(-\left[\frac{\ln(R)-\mu}{\sigma}\right]^2/2\right)/(R\sigma\sqrt{2\pi}), \quad (1)$$

где μ – математическое ожидание, $\mu = \langle R \rangle$; σ – среднее квадратичное отклонение.

Достоверность принятого закона распределения оценивали по статистическому критерию Пирсона χ^2 . Доверительная вероятности определения элементов структуры составила 95% при уровне значимости $p=0,05$. Оценку проводили следующим образом: определяли размеры элементов структуры (объем выборки не менее 250 измерений), разбивали массив данных на несколько примерно равных частей, но не менее восемь интервалов [3], аппроксимировали гистограммы каждым из альтернативных законов, на основании принятого закона распределения вычисляли вероятности p_i попадания случайной величины d в i -й интервал. Количество элементов в интервале – более восьми [3]. При определении количества интервалов k в зависимости от объема выборки n использовали рекомендации ВНИИМетрологии [4, 5]:

n	k
40–100	7–9
100–500	8–12
500–1000	10–16
1000–10000	12–22

Отклонение выборочного распределения от предполагаемого (χ^2) вычисляли по формуле [3]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (3)$$

где k – число интервалов; n – объем выборки.

Гипотезу о принятом законе распределения принимали на заданном уровне значимости, исходя из соотношения:

$$\chi^2 < \chi^2_{1-p}, \quad (4)$$

где χ^2_{1-p} – значение, определяемое из таблиц [3] при заданном уровне значимости p .

Результаты исследований и их обсуждение

Типичная структура речного мартенсита, формирующаяся после охлаждения НМС 15X2Г2НМФБ на воздухе непосредственно после прокатного нагрева, представлена на рис. 1, *а*, и после дополнительной закалки (рис. 1, *б*). Речная структура практически не отличается, но заметны отличия дислокационной структуры.

У закаленных с прокатного нагрева образцов плотность дислокаций порядка $2-4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и в несколько раз выше, чем у образцов с дополнительным нагревом при охлаждении на воздухе [7].

Распределение реек по ширине стали 15X2Г2НМФБ закаленной с прокатного нагрева, представлено на рис. 2, наиболее вероятная ширина реек – 250 нм, средняя – 260 нм, значение критерия Пирсона $\chi^2 = 12,6$, коэффициент вариации $V = 0,5$.

Табличные значения этого критерия для уровня значимости $p=0,02$ $\chi^2 = 13,4$ и для $p=0,05$ $\chi^2 = 11,1$, что означает выполнение с высокой вероятностью логнормального закона распределения.

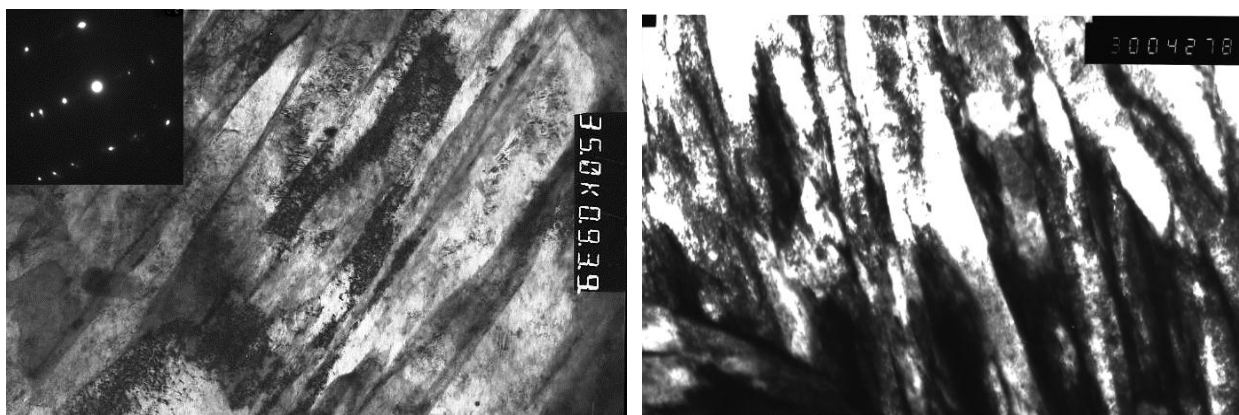
*а**б*

Рис. 1. Речная структура мартенсита стали 15X2Г2НМФБ:

а – горячекатаная, $\times 35000$;
б – закаленная с $950 \text{ }^\circ\text{C}$, $\times 30000$

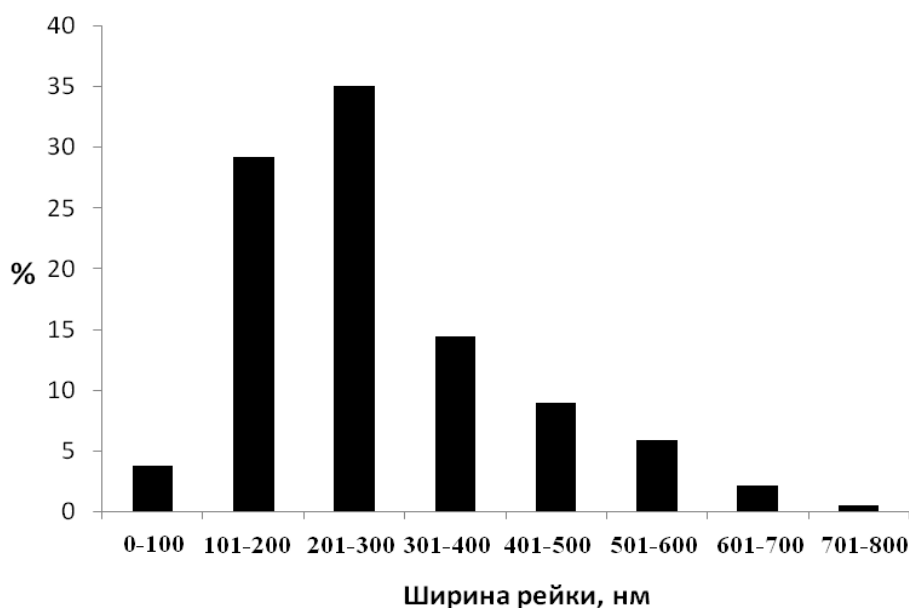
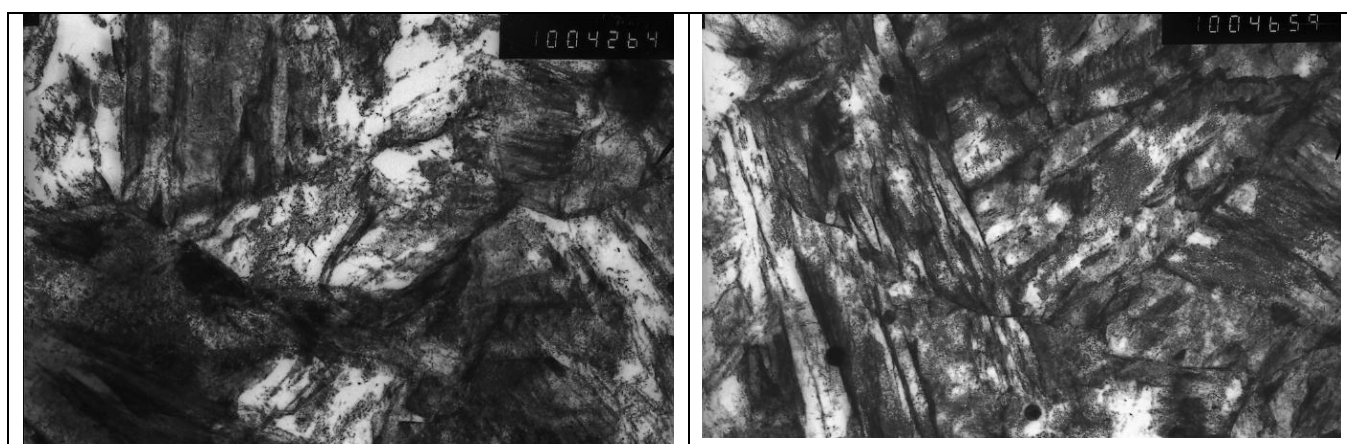


Рис. 2. Распределение реек по ширине стали 15X2Г2НМФБ в состоянии с прокатного нагрева

Рейки объединены в пакеты с различными углами разориентации (рис. 3). Оценки размеров пакетов показали, что их средний размер составляет примерно 2,5 мкм. В границах бывшего аустенитного зерна в среднем находятся от 2 до 10 пакетов.

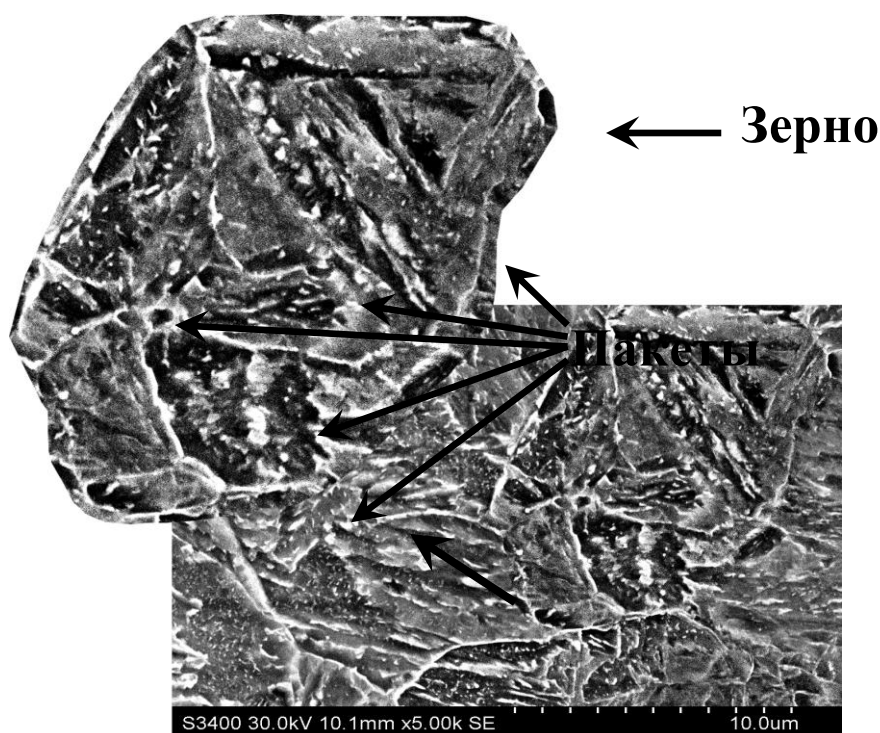
Выделения карбидов имеют нанометрический размер (ширина – 15-20 нм, длина – 100-115 нм) и не менее двух направлений ориентации (рис. 4, а), что является отличительным признаком именно мартенситной структуры [8]. Для большей наглядности представлены инвертированная микрофотография (рис. 4, б).

Признаки фрагментирования (образование дислокационных субграниц) появляются после охлаждения горячекатаной стали на воздухе (рис. 5). Фрагментирование в процессе охлаждения при наличии нескольких морфологических типов мартенсита наблюдают только в мартенсите с пакетно-речечным строением [9].



а

б



в

Рис. 3. Пакетная структура низкоуглеродистого мартенсита НМС 15Х2Г2НМФБ:
а, б – просвечивающая электронная микроскопия, $\times 10000$;
в – сканирующая электронная микроскопия, $\times 5000$

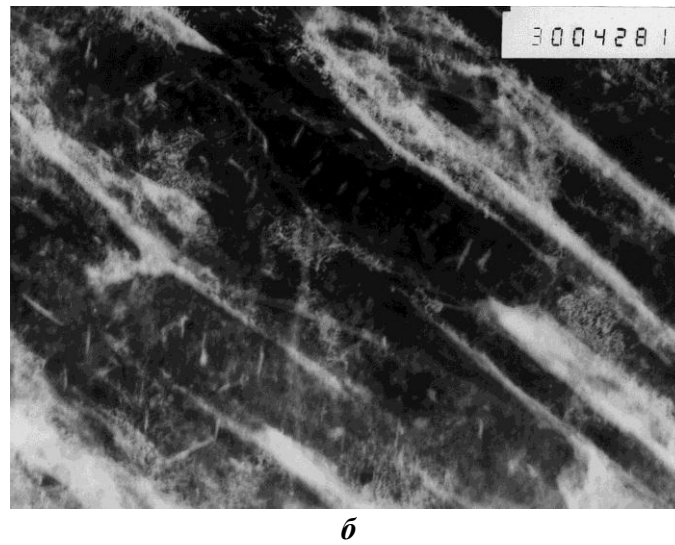
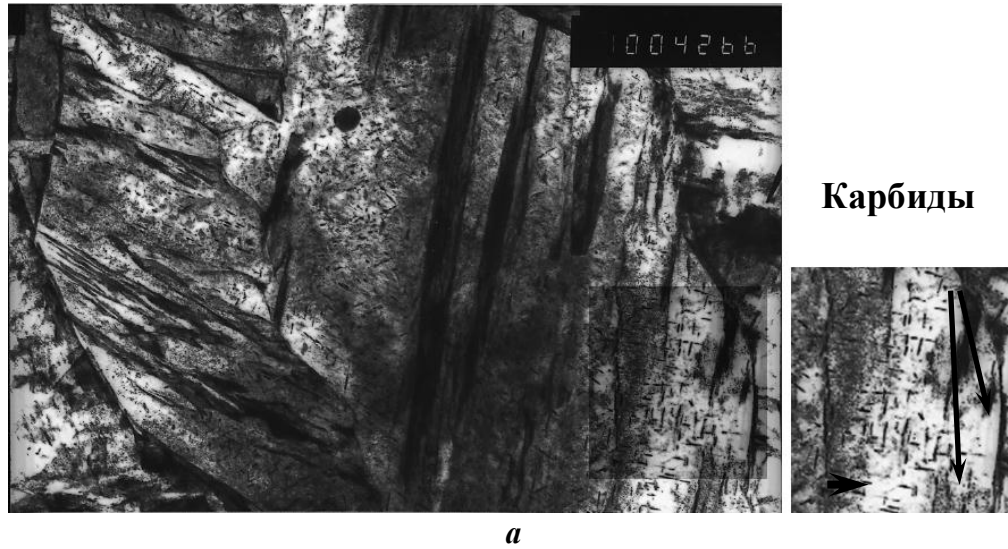


Рис. 4. Низкоуглеродистый мартенсит горячекатаной стали 15X2Г2НМФБ с характерными выделениями карбидов:
a – x10000; *б* – x30000

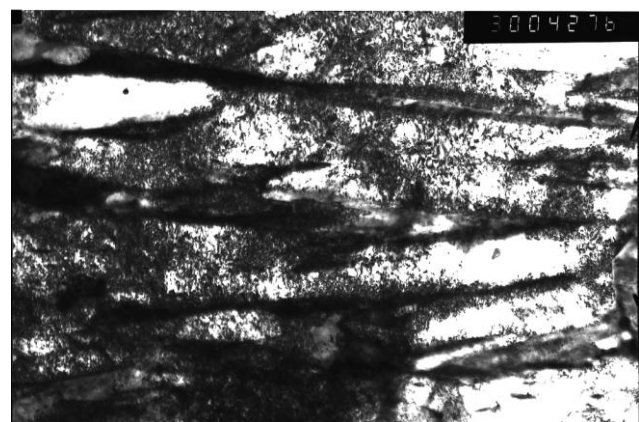
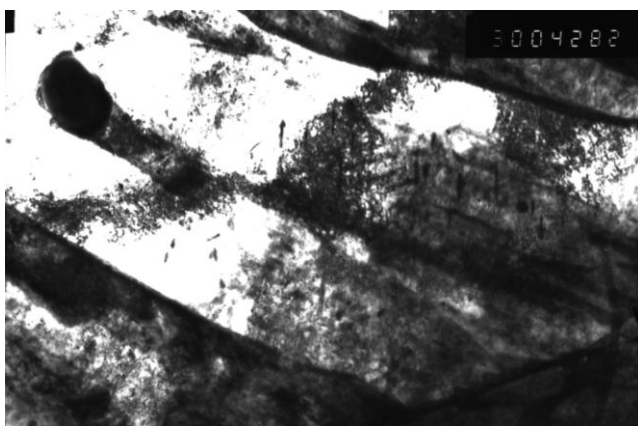


Рис. 5. Начальный этап фрагментирования стали 15X2Г2НМФБ, x30000:
a – поперек реек; *б* – вдоль и поперек реек

Таким образом, высокие свойства закаленной с прокатного нагрева НМС 15Х2Г2НМФБ во многом обусловлены формированием ячеистой структуры мартенсита.

Выводы

Иерархическая структура низкоуглеродистого мартенсита, закаленного с прокатного нагрева, формируется в границах зерна аустенита и включает: пакеты рейки и фрагменты реек.

Внутри реек обнаружены выделения карбидов не менее двух направлений ориентации шириной – 15-20 нм и длиной порядка 100 нм.

Высокие механические свойства закаленных с прокатного нагрева НМС во многом обусловлены формированием наноразмерных характерных элементов структуры.

Библиографический список

1. Физическое материаловедение / под ред. Р. Кана: [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1968. Вып. 3. – 484 с.
2. Штремель, М.А. Прочность сплавов. Ч II. Деформация / М.А. Штремель. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
3. Ахназарова, С.Л. Методы организации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1985. – 319 с.
4. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 120 с.
5. Лемешко, Б.Ю. О выборе числа интервалов к критериям согласия типа χ^2 / Б.Ю. Лемешко, Е.В. Чимитова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. С. 61–67.
6. Утевский, Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в материаловедении / Л.М. Утевский. – М.: Metallurgy. 1973. – 584 с.
7. Югай, С.С. Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С.С. Югай [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 12. С. 24–29.
8. Климашин, С.И. Влияние термической обработки на морфологию мартенсита и эволюцию дефектной структуры литой среднелегированной конструкционной стали: дис. ... канд. техн. наук / С.И. Климашин. – Новокузнецк, 2006. – 18 с.
9. Козлов, Э.В. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э.В. Козлов [и др.]. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 177 с.

Дата поступления
в редакцию 17. 06.2011

I.V. Ryaposov, L.M. Kleyner, A.A. Shatsov, P.A. Zakrevskaya

STRUCTURE OF LATH MARTENSITE OF HOT-ROLLED LOW-CARBON MARTENSITIC STEEL 15Cr2Mn2NiMoVNb

The features of packet-rack martensite of low-carbon martensitic steel (NMS) after cooling from the rolling heat were explored. It was established that the distribution of racks in width described by a logarithmic normal law. The statistical description of the fine structure of the NMS was given.

Key words: low-carbon martensite, racks, packets, fragments, cells, carbides.