

**Ксения Юрьевна Куртева<sup>1\*</sup>, Екатерина Александровна Яковлева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия

\**njk3@crism.ru*

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗАКАЛКЕ С ПРОКАТНОГО НАГРЕВА НА ФОРМИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХРОМОНИКЕЛЬМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ

Для установления влияния режимов горячей деформации при идентичных условиях закалки и отпуска на формирование структуры, текстуры и свойств толстолистового проката из хромоникельмолибденовой стали выполнен анализ структур проката методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) и сравнение с результатами металлографических исследований. Согласно полученным результатам, увеличение наклепа деформированного аустенита приводит к формированию высокотемпературного бейнита в процессе последующего термического улучшения и, как следствие, изменению механических свойств.

*Ключевые слова:* горячая пластическая деформация, хромоникельмолибденовая сталь, текстура, аустенит, речный бейнит, гранулярный бейнит.

***Ksenia Yu. Kurteva, Ekaterina A. Yakovleva***

NRC "Kurchatov Institute" - Central Research Institute of KM "Prometheus", St. Petersburg, Russia

## EFFECT OF HOT ROLLING MODES OF DIRECTLY QUENCHED ON THE FORMATION OF THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMIUM-NICKEL-MOLYBDENUM STEEL

To determination the effect of hot rolling modes under identical quenching and tempering conditions on the formation of the structure, texture and properties of thick-rolled chromium-nickel-molybdenum steel, the analysis of the final structures of sheet metal by electron backscatter diffraction (EBSD) was performed and compared with the results of metallographic studies. According to the results obtained, an increase in the hardening of deformed austenite leads to the formation of high-temperature bainite in the process of heat treatment and a change in mechanical properties.

*Keywords:* hot rolling, chromium-nickel-molybdenum steel, texture, austenite, lath bainite, granular bainite.

Хромоникельмолибденовая сталь с бейнитно-мартенситной структурой широко используются в судостроении благодаря высокому сочетанию

прочностных, вязкопластических свойств, хладостойкости и хорошей свариваемости [1]. Достичь требуемых значений механических характеристик такой стали возможно с применением технологии закалки с прокатного нагрева (ЗПН) с последующим высоким отпуском.

В настоящей работе с помощью текстурного анализа проведены исследования влияния различных схем горячей прокатки на состояние бывшего аустенита для оценки его влияния на механические свойства высокопрочной стали при неизменных условиях закалки и последующего отпуска.

В настоящей работе был исследован листовой прокат толщиной 18 мм, изготовленный из низкоуглеродистой стали марки 09ХН2МД на стане «5000» по технологии закалки с прокатного нагрева с последующим высоким отпуском.

Химический состав исследуемой стали: 0,08 % С, 0,21% Si, 0,34% Mn, 0,006% Р, 0,002% S, 0,33% Cr, 2,61% (Ni+Cu), 0,26% Мо. Режимы горячей деформации представлены в таблице 1. Режимы производства исследуемых прокатов отличаются только режимами деформации: от проката 1 к прокату 3 увеличивается значение среднего относительного обжатия и варьируется среднее значение температуры прокатки на финальных проходах.

Таблица 1

Режимы прокатки исследуемых листов

№ проката	Толщина сляба, мм	Толщина листа, мм	Т начала прокатки, °С	Условие обработки на последних 5-ти проходах		Т начала УКО, °С
				Средняя температура, °С	Среднее относительное обжатие, %	
1	300	18	990	953	11	900
2				977	14	
3				913	16	

Структуры листового проката после ЗПН и последующего отпуска показаны на рисунке 1. Микроструктура всех прокатов преимущественно бейнитная, однако видно, что режим 1 с минимальными средними обжатиями на финальной стадии прокатки приводит к формированию преимущественно бейнита речной морфологии. В структуре прокатов 2 и 3 преобладает бейнит гранулярной морфологии.

При одинаковых условиях закалки и отпуска наблюдаются изменения в механических свойствах листового проката, таблица 2: с увеличением среднего относительного обжатия от 11% до 16% от проката 1 к прокату 3 на финальной стадии горячей деформации происходит снижение предела текучести от 670 МПа до 610 МПа и временного сопротивления от 720 МПа до 690 МПа, что может быть обусловлено изменением морфологии бейнита.

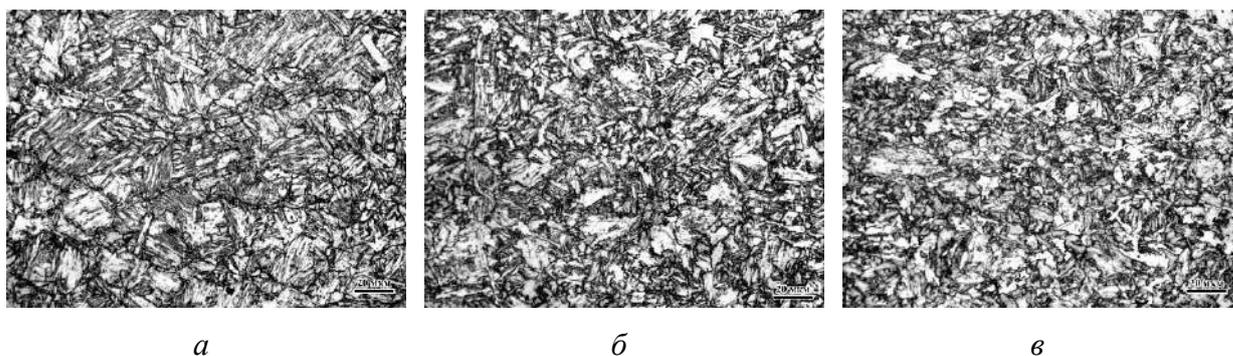


Рис. 1. Изображения микроструктуры листовых прокатов а) 1, б) 2 и в) 3

Таблица 2

Механические свойства листовых прокатов

№ проката	Среднее относительное обжатие, %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1	<b>11</b>	720	<b>670</b>	25	80
2	<b>14</b>	710	<b>630</b>	20	80
3	<b>16</b>	690	<b>610</b>	22	82

Для установления причины снижения прочностных характеристик стали при увеличении среднего относительного обжатия на финальной стадии горячей деформации необходимо установить степень наклепа аустенита перед ускоренным охлаждением, что возможно с помощью текстурного анализа стали.

Наиболее совершенно и точно воспроизводят текстуру полюсные фигуры, однако для получения необходимой информации относительно свойств материала с данной текстурой необходимо выполнить ее расшифровку. Более совершенным способом описания текстуры является вычисление по нескольким прямым полюсным фигурам функции распределения ориентации (ФРО) [2]. В результате  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в сечении ФРО образуются изолированные друг от друга области, рисунок 2, отвечающие компонентам текстуры ОЦК поликристалла, по которым можно установить в каком состоянии находился аустенит перед превращением. Для анализа результатов EBSD по этим сечениям будет использоваться схема превращения текстурных компонент исходной фазы [3], показанных на рисунках 2. В соответствии с рисунком 2 б, компонента куба (Cube), характерная для рекристаллизации аустенита, преобразуется в четыре максимума типа transformed Cube бейнита, а рисунок 2 в иллюстрирует преобразование компонент текстуры прокатки (Brass, Cu и относительно слабая Goss).

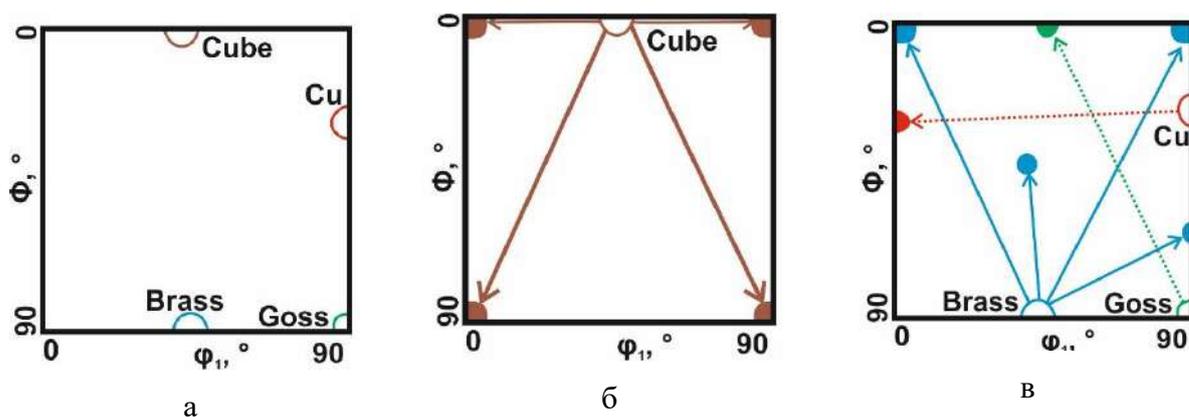


Рис. 2. Двумерное сечение ФРО  $\phi_1$ – $\Phi$  при  $\phi_2=45^\circ$ : а – компоненты текстуры рекристаллизации (Cube) и деформации (Cu, Brass, Goss) аустенита при прокатке; преобразование компонент текстуры рекристаллизации (б) и деформации (в) аустенита в результате его бейнитного превращения [3]

Исследование характеристических сечений ФРО, представленных на рисунке 3, показали, что главными составляющими для всех листовых прокатов являются компоненты Transformed Cu и Transformed Brass, характерные для деформированного состояния  $\gamma$ -фазы перед превращением. Острота текстуры увеличивается от проката 1 к прокату 3, что говорит об увеличении наклепа аустенита с ростом значения среднего относительного обжатия.

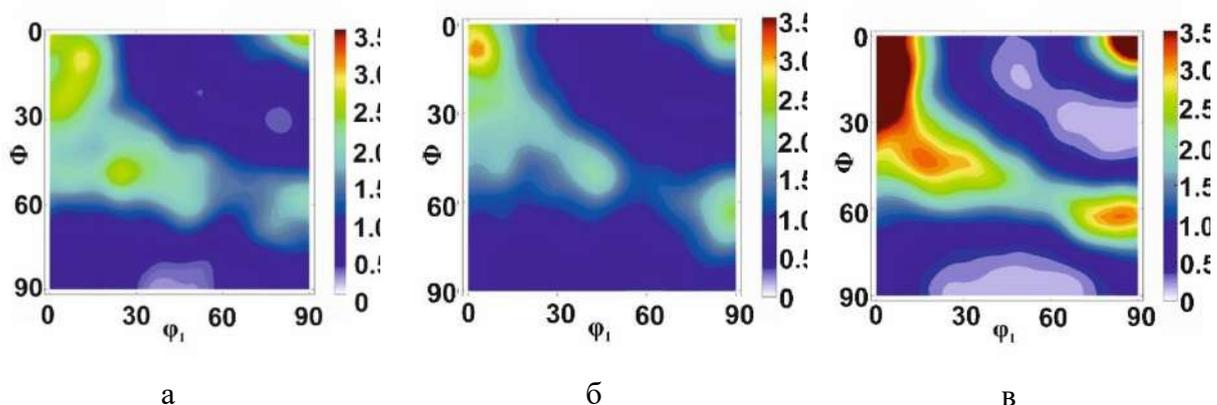


Рис. 3. Сечение ФРО  $\phi_1$ – $\Phi$  при  $\phi_2 = 45^\circ$  для исследованных листовых прокатов: а – прокат 1, б – прокат 2, в - прокат 3

Таким образом, согласно исследованиям предел текучести листовых прокатов увеличивается по мере снижения наклепа аустенита на финальной стадии деформации.

Текстурный и структурный анализ методом EBSD позволяет выявить зависимость состояния исходной (аустенит) и превращенной (бейнит) фаз низкоуглеродистой высокопрочной стали от режима горячей прокатки.

Установлено, что наиболее наклепанное состояние аустенита перед ускоренным охлаждением способствует увеличению температуры  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения и, как следствие, формированию в структуре стали преимущественно гранулярного бейнита с наиболее низкими прочностными

характеристиками. Для получения более прочного бейнита речной морфологии необходимо ограничивать обжатия на финальной стадии деформации.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали- СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016- 212 с.
2. Сильникова Е.Ф., Сильников М.В. Кристаллографическая текстура и текстурообразование // СПб.: Наука, 2011-560 с.
3. Jonas J.J. Transformation textures associated with steel processing // Microstructure and Texture in Steels. 2009. Springer, New York. P. 3-17.