

УДК 669.15.018-194

А.Н. Юрченко

A.N. Yurchenko

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 29Х2Г2МФС2 ПОСЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN STEEL 29CR2MN2MOVSI2 AFTER CONTINUOUS COOLING AND ISOTHERMAL EXPOSURE

Проведено исследование стали 29Х2Г2МФС2 при различных режимах термической обработки. Выявлена возможность получения нижнего бейнита после непрерывного охлаждения и изотермической выдержки с повышенными характеристиками механических свойств. Представлены результаты световой металлографии и механических испытаний.

Ключевые слова: непрерывное охлаждение, изотермическая выдержка, нижний бейнит, верхний бейнит, аустенит.

The steel investigated 29Cr2Mn2MoVSi2 at different modes of heat treatment. The possibility of obtaining revealed lower bainite after continuous cooling and isothermal exposure with increased characteristics mechanical properties. Presents the results the light metallography and mechanical testing.

Keywords: continuous cooling, isothermal exposure, lower bainite, upper bainite, austenite.

В настоящий момент получением бейнитной структуры, в частности нижнего бейнита, занимается большое количество исследователей во всем мире [1–3]. Такой интерес вызван свойствами, которые приобретает материал за счет структуры нижнего бейнита, в результате чего возможно получение комплекса механических свойств: одновременного повышения прочности, пластичности, надежности материала. Существуют заключения о том, что есть возможность получения нижнего бескарбидного бейнита [1–3]. Нижний бескарбидный бейнит можно получить, если обеспечить отток углерода из бейнита в остаточный аустенит [3]. К основным легирующим элементам в сталях для образования нижнего бескарбидного бейнита относятся хром, марганец, кремний [4–6].

В данной статье будет рассмотрено образование структуры нижнего бейнита с повышенными механическими характеристиками за счет непрерывного охлаждения и изотермической выдержки.

Материалы и методы исследования. Нами были исследованы образцы из экономно легированной стали 29Х2Г2МФС2, химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 29Х2Г2МФС2

Сталь	Содержание элементов, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
29Х2Г2МФС2	0,29	1,7	1,53	0,015	0,011	2,2	0,32	0,36	0,09

Состояние поставки стали 29Х2Г2МФС2 – высокоотпущенные ($T = 660$ °С, 120 мин) кованые прутки.

Термическую обработку проводили при следующих режимах:

- 1) нагрев до $T = 880$ °С с выдержкой 60 мин и последующее полное охлаждение на воздухе;
- 2) нагрев до $T = 880$ °С с выдержкой 60 мин и последующее полное охлаждение с печью;
- 3) нагрев до $T = 880$ °С с выдержкой 60 мин, охлаждение на воздухе до $T_{\text{Изо}} = 275$ °С, выдержка при $T_{\text{Изо}}$ составила 360 мин с последующим охлаждением на воздухе.

После каждого режима проводился низкий отпуск при $T = 200$ °С с выдержкой 120 мин и охлаждением на воздухе.

Характеристики прочности и пластичности определяли на коротких цилиндрических образцах с начальным диаметром 5 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–73 на разрывной машине Р5. Результаты испытаний обрабатывали построением диаграмм растяжения при использовании программного продукта LGraph. После каждого режима обработки испытывали не менее двух образцов.

Ударные испытания проводили на маятниковом копре КМ-30 на образцах с размерами $10 \times 10 \times 55$ мм с V- и U-образными надрезами. Ударную вязкость рассчитывали по формуле

$$KCV (KCU) = A_p / F,$$

где A_p – работа разрушения, снимаемая со шкалы копра с точностью до $\pm 0,05$ кгс; F – площадь живого сечения образца, см^2 .

Оценку твердости исследуемых материалов проводили на твердомере ТК по методу Роквелла (шкала С) в соответствии с требованиями ГОСТ 9013–59. Значение твердости определяли как среднее арифметическое по результатам 4–6 замеров.

Микроструктуру исследовали на шлифах, приготовленных на поперечном сечении ударных образцов. Для травления использовали 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Травленные микрошлифы исследовали на световом инвертированном микроскопе Olympus GX-51 при увеличении $\times 1000$.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследование структуры стали 29Х2Г2МФС2 проводилось в поперечном направлении ударных образцов (рисунок). После всех режимов термической обработки структура данной стали является смешанной. Исследуемая сталь относится к мартенситному классу сталей, поэтому закаливается на воздухе на структуру мартенсита. Для первого режима (см. рисунок, а) закономерно в структуре наблюдается мартенсит, также выделяется нижний бейнит. Это очень хорошо заметно, так как данные структурные составляющие отличаются по травимости. Бейнит всегда травится сильнее, что замечено и в других исследованиях [7]. Мартенсит является пакетным, а нижний бейнит можно охарактеризовать как переходный продукт превращения, который имеет игольчато-пакетное строение. Такой бейнит располагается по границам пакетов мартенсита и образуется на стыке границ. Можно сделать заключение, что микроструктура после режима № 1 является неоднородной. Кроме мартенсита и нижнего бейнита, замечены некоторые светлые выделения в виде пластин, которые, возможно, являются аустенитом. Пластины, в свою очередь, могут являться концентраторами напряжений, как и бейнит, который образуется на границах и имеет квази-игольчатое строение. Это объясняется самыми высокими характеристиками прочности ($\sigma_b = 1793$ МПа, а $\sigma_{0,2} = 1420$ МПа) и низкими ударными показателями ($KCV = 37,6$ Дж/см², $KCU = 81,4$ Дж/см²) среди всех режимов. Все данные по механическим свойствам сведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства исследуемой стали 29Х2Г2МФС2

Режим обработки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCV, Дж/см ²	KCU, Дж/см ²	HRC
Непрерывное охлаждение							
Зак. 880 °С, охлаждение на воздухе	1793	1420	14,9	44,05	37,6	81,4	45
Зак. 880 °С, охлаждение с печью	1476,5	1087,5	14,55	41,25	41,2	92,35	40
Изотермическая выдержка							
Зак. 880 °С, $T_{\text{изо}} = 275$ °С (360 мин)	1653,5	1310	13,4	50,6	53,2	93,9	45

Примечание: при температуре закалки выдержка составляла 60 мин; охлаждение до $T_{\text{изо}}$ проводилось на воздухе; после каждого режима для каждой плавки был проведен отпуск при $T = 200$ °С с выдержкой 120 мин и охлаждением на воздухе.

При понижении скорости охлаждения (охлаждение с печью) происходит выравнивание однородности структуры (см. рисунок, б). Она состоит из смеси бейнита и мартенсита. В структуре также наблюдаются некоторые области, которые имеют так называемое «кудреватое» строение, похожи на верхний бейнит. Светлых отдельно расположенных пластинок аустенита не обна-

ружено. Вследствие этого происходит снижение прочностных показателей до $\sigma_b = 1476,5$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1087,5$ МПа, а значения ударной вязкости незначительно увеличиваются: $KCV = 41,2$ Дж/см², $KCU = 92,35$ Дж/см².

Режим позволил получить оптимальные показатели механических характеристик по сравнению с предыдущими режимами термической обработки (см. табл. 2). Структура является наиболее однородной, не обнаружено присутствия верхнего бейнита (см. рисунок, в). В свою очередь, микроструктура смешанная, состоящая из нижнего бейнита и мартенсита. На общем фоне выделяется некоторое количество остроугольных пластин аустенита.

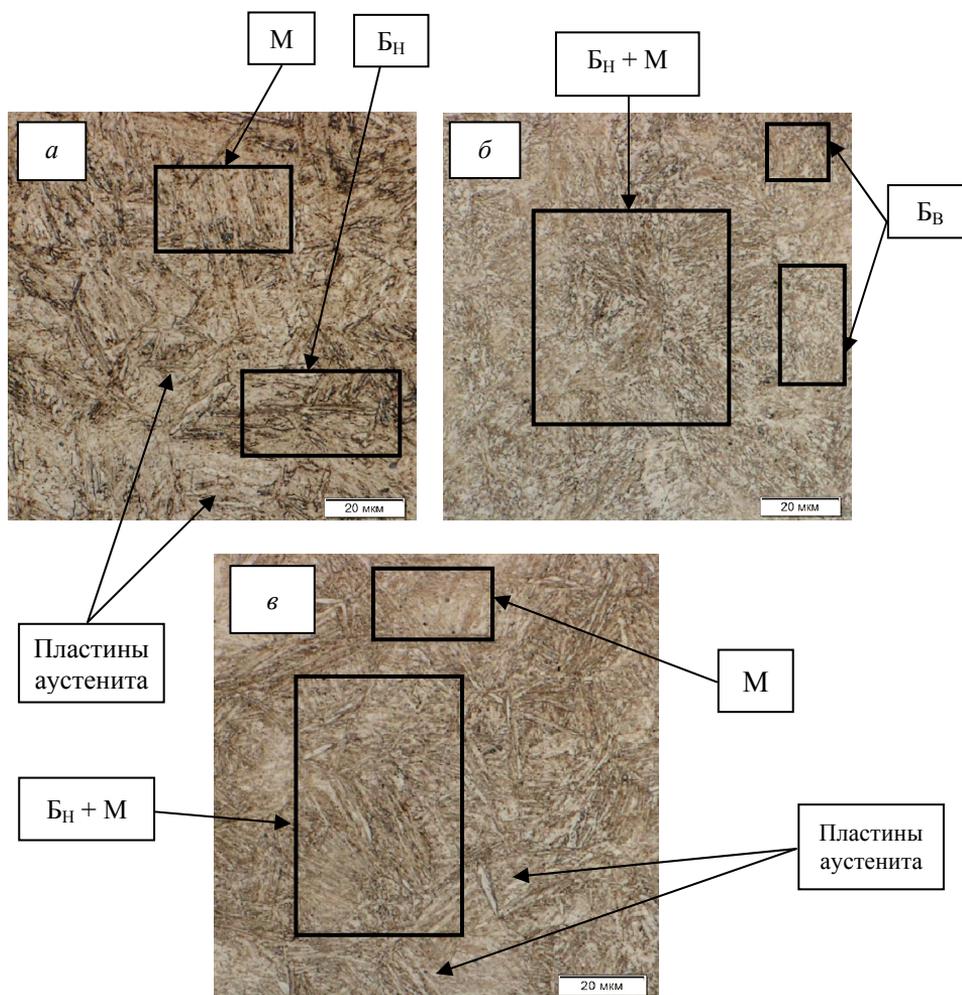


Рис. 1. Микроструктура стали 29Х2Г2МФС2 после режимов термической обработки: а – 1-й режим; б – 2-й режим; в – 3-й режим; БН – бейнит нижний; БВ – бейнит верхний; М – мартенсит; увеличение $\times 1000$

Выводы. Структура исследуемой стали 29Х2Г2МФС2 после непрерывного охлаждения и изотермической выдержки является смешанной, в основном состоит из нижнего бейнита и пакетного мартенсита. Замечены некоторые области (светлые пластинки) аустенита после режимов № 1 и 3. Наиболее однородной является структура после непрерывного охлаждения с печью.

В структуре стали 29Х2Г2МФС2, как и ожидалось, был получен нижний бейнит, который улучшает механические свойства стали, особенно при изотермической выдержке.

Максимальные показатели прочности наблюдаются после применения режима № 1. Они находятся на следующих уровнях: $\sigma_b = 1793$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1420$ МПа. Оптимальный комплекс механических свойств был получен после применения изотермической выдержки (см. табл. 2).

Список литературы

1. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steels. – 2nd edition. – London: The Institute of Materials, 2001. – 460 p.

2. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite // Current Opinion in Solid State and Materials Science: DK 8. – 2004. – P. 251–257.

3. Калетин А.Ю., Калетина Ю.В. Повышение вязкости конструкционных сталей при образовании бескарбидного бейнита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 22–30.

4. Леонтьев П.А., Иванова А.С., Симонов Ю.Н. Исследование фазовых превращений и структуры кремнистых сталей с различным содержанием углерода при непрерывном охлаждении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 33–39.

5. Исследование кинетики образования нижнего бейнита в структуре высокоуглеродистой низколегированной стали / А.Д. Коваль, М.Н. Брыков, А.Е. Капустян, Д.Н. Тимофеев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 2. – С. 17–21.

6. Калетин А.Ю., Калетина Ю.В. Эволюция структуры и свойств кремнистых сталей при фазовом переходе аустенит – бейнит // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57, вып. 1. – С. 56–62.

7. Mechanical behavior of carbide-free medium carbon bainitic steels / X. Zhang, G. Xu, X. Wang, D. Embury, O. Bouaziz, G.R. Purdy, H.S. Zurob // Metallurgical and Materials Transactions. – 2014. – № 3. – P. 1352–1361.

Получено 07.12.2015

Юрченко Александр Николаевич – аспирант кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: sanyaurchenko@rambler.ru.

Научный руководитель – **Симонов Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: mto@pstu.ru.