

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 621.771.25-426:621.78.08

Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Перчаткин А.В.

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В КАТАНКЕ ПОВЫШЕННОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ Св-08Г2С С МИКРОДОБАВКАМИ БОРА

Исследовано влияние снижения содержания упрочняющих элементов в стали в пределах допустимых значений и дополнительное легирование бором на кинетику превращения, структуру и свойства в катанке для сварочной проволоки. Изменение химического состава стали и использование изотермической выдержки в процессе охлаждения на линии Стелмор в интервале 550–600 °C приводит к получению структуры без бейнитно-мартенситных фаз, что определяет возможность волочения катанки в проволоку без промежуточного отжига.

Ключевые слова: катанка, распад аустенита, структура, бейнит, мартенсит, пластичность.

The influence of reducing the amount of reinforcing elements in the steel in the range of valid values and additional boron alloying on the transformation kinetics, structure and properties of wire rod for welding wire was investigated. Changing of the chemical composition of steel and the use of isothermal exposure in the cooling process on the line Stelmor in the range 550–600 °C results in obtaining structure without bainite-martensite phases, which determines the possibility of drawing wire rod into wire without intermediate annealing.

Key words: wire rod, decomposition of austenite, structure, bainite, martensite, plasticity.

В сварочной индустрии при производстве корпусов речных и морских судов, сварке изделий различного общетехнического назначения широко применяется омедненная сварочная проволока диаметром 2.0–0.8 мм из низкоуглеродистой легированной стали марки Св-08Г2С. Однако при волочении на малый диаметр катанки диаметром 5.5–6.5 мм из этой стали необходима промежуточная термическая обработка, повышающая себестоимость проволоки. Поэтому целью и задачами исследования явились корректировка химического состава низкоуглеродистой легированной стали и разработка поточной термомеханической обработки катанки на линии Стелмор для безотжигового волочения сварочной проволоки.

Структура и механические свойства катанки из стали Св-08Г2С определяются количественным соотношением и морфологией её структурных составляющих, которые формируются в процессе охлаждения после прокатки. Известно [1–7], что наличие в структуре продуктов мартенситного и промежуточного превращений снижает деформируемость, повышает обрывность катанки при волочении в проволоку и требует использования промежуточного рекристаллизационного отжига. Проблему получения катанки с минимальным количеством мартенситной и бейнитной составляющих и свойствами, позволяющими проводить безотжиговое волочение, можно решить в совокупности, используя снижение содержания упрочняющих элементов (С, Мn, Si) до минимальных значений в пределах требований нормативной документации, дополнительным легированием бором и совершенствованием условий охлаждения после прокатки.

Бор двояко влияет на образование бейнитной и мартенситной составляющих структуры. С одной стороны, бор увеличивает устойчивость аустенита к распаду и способствует повышению количества бейнитно-мартенситных участков (БМУ), с другой стороны, введение бора в соотношении с азотом $B/N = 0.8 \pm 0.15$ связывает азот, снижая твердорастворное упрочнение феррита, повышая пластичность, а связанный бор не участвует в повышении прокаливаемости. Кроме того, введение бора при одновременном снижении содержания углерода, марганца и кремния приводит к уменьшению ликвации легирующих элементов, которая усиливает формирование БМУ. Учитывая, что влияние первого фактора уменьшается путем снижения скорости охлаждения после прокатки, можно ожидать положительное влияние бора на пластичность катанки [4, 8–11].

В качестве материала для исследования была выплавлена сталь марки Св-08Г2С, дополнительно легированная бором, с пониженным содержанием легирующих элементов в рамках марочного состава с учетом минусовых допусков, из которой получена катанка диаметром 5.5 мм (табл. 1).

Прокатку в проволочном блоке проводили со скоростью 100 м/с, температура после участка водяного охлаждения на виткообразователе линии Стелмор (фактически это температура аустенитизации) составила 950–970 °C, скорость транспортировки витков на роликовом конвейере равнялась 0.09–0.12 м/с, время выдержки витков катанки под закрытыми теплоизолирующими крышками составило 20 мин, все блоки струйного охлаждения были отключены.

Химический состав опытной плавки

Элемент	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	B	B/N	C ₉	Mn ₉
Опытная плавка	0.07	1.79	0.78	0.018	0.008	0.04	0.09	0.17	0.007	0.0084	1.20	0.566	2.104
Требования ГОСТ 2246	0.05	1.80	0.70	Не более					0.010	н.н.	н.н.	н.н.	н.н.
	0.11	2.10	0.95	0.030	0.025	0.20	0.30	0.25					

Примечание: н.н. – не нормируется.

В результате этого скорость на воздушном участке охлаждения соответствовала $0.30^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Механические свойства катанки из опытной плавки после прокатки составили: $\sigma_{\text{в}} = 500\text{--}505\text{ МПа}$; $\sigma_{\text{т}} = 200\text{--}288\text{ МПа}$; $\delta_5 = 37\text{--}39\%$; $\Psi = 71\text{--}72\%$. Структура катанки после прокатки представляет собой смесь феррита (80–88%), перлита (8–13%) и БМУ (7–12%), при величине зерна феррита № 8–7 (рис. 1).

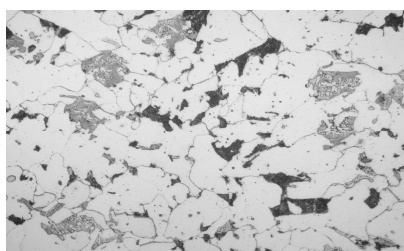


Рис. 1. Микроструктура исходной катанки, x500

Для определения необходимых скоростей охлаждения с целью предотвращения образования БМУ на дилатометрах АД-80 и МД-83 были определены температуры распада аустенита в стали Св-08Г2С со скорректированным химическим составом, приводящим к изменению температурно-временных интервалов превращения при охлаждении. Результаты исследования кинетики фазовых превращений при непрерывном охлаждении обобщены в виде ТКД и структурной диаграммы (рис. 2).

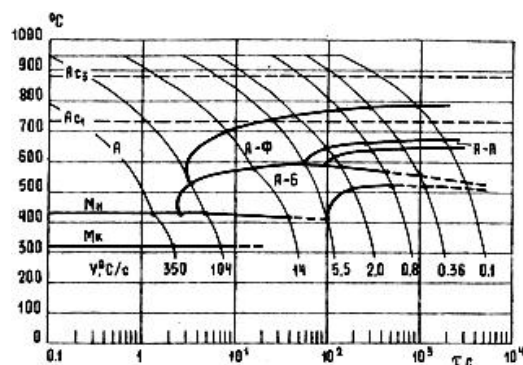
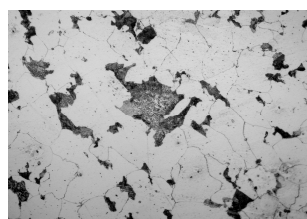


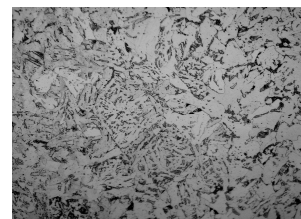
Рис. 2. Термокинетическая (а) и структурная (б) диаграммы превращений аустенита в стали Св-08Г2С (C = 0.07%; Mn = 1.79%; Si = 0.78%, B = 0.0084%)

При малой скорости охлаждения до $0.8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ основной структурной составляющей является феррит с небольшим количеством перлита и бейнита. Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению бейнитной фазы и в конечном итоге к полностью мартенситной структуре (рис. 3). Таким образом, для стали мар-

ки Св-08Г2С с бором бейнитное превращение начинается при температуре $600\text{--}550^{\circ}\text{C}$, и область превращения значительно сдвинута вправо (время инкубационного периода примерно 30 с), что способствует образованию в стали бейнитных и мартенситных структур при меньших скоростях охлаждения по сравнению как со сталью 09Г2С, так и Св-08Г2С без бора, у которой инкубационный период не превышает 1 с.



а



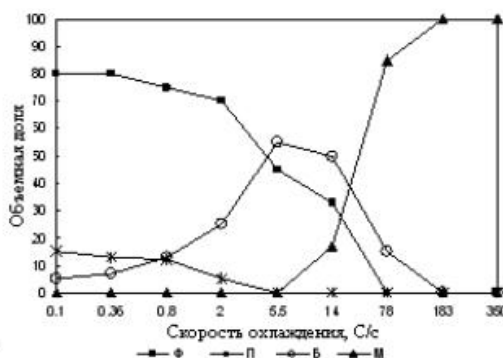
б



в



г

Рис. 3. Микроструктура (x500) катанки из стали Св-08Г2С с бором после предварительной аустенитизации при температуре 950°C и последующего охлаждения со скоростью ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$): а – 0.1; б – 5.5; в – 14.0; г – 350

Микротвердость дилатометрических образцов, охлажденных после предварительной аустенитизации со скоростями в интервале $0.1\text{--}350^{\circ}\text{C}/\text{с}$, приведена на рис. 4.

Для минимизации количества бейнитно-мартенситных участков и повышения деформируемости при

безотжиговом волочении катанки из исследуемой стали наиболее приемлемым является обеспечение низкой скорости охлаждения катанки от температур аустенитного состояния до температур $600\text{--}550^{\circ}\text{C}$ и длительной выдержки при этой температуре для уменьшения количества БМУ.



Рис. 4. Микротвердость дилатометрических образцов, охлажденных со скоростями 0.1; 0.36; 0.8; 2.0; 5.5; 14.0; 104.0; 350.0°C/c (верхняя кривая – максимальное, нижняя – минимальное значения)

В связи с этим в лабораторных условиях было исследовано влияние изотермической выдержки на формирование структуры и свойств катанки из стали с бором. Для этого аустенизацию образцов катанки проводили при температуре, максимально приближенной к температуре виткообразования – 950°C, осуществляли выдержку при этой температуре в течение 5–10 мин (t_1) в первой печи, а затем изотермическую выдержку во второй печи (табл. 2).

Таблица 2

Режимы изотермической выдержки катанки

Номер образца	Время аустенизации, t_1 , мин и при $t_1 = 950^\circ\text{C}$	Изотермическая выдержка	
		Температура t_2 , °C	Время t_2 , мин
1	5	750	30
2	5	700	30
3	5	650	30
4	5	600	30
5	10	550	20
6	10	550	30
7	10	500	20
8	10	500	30

На контрольных образцах без изотермической выдержки микроструктура представляет собой смесь феррита – примерно 80%, БМУ – 6–11%, перлита – 9–14%. В отдельных участках большинства образцов наблюдается структурная полосчатость 0.5–2 балла и видманштеттова структура до 1 балла. Все образцы характеризуются разнотернистостью феррита по сечению в интервале 3–4 номеров.

Микроструктура в исследованных образцах, кроме образцов 4, 5 и 6, характеризуется значительным количеством БМУ и развитой структурной полосчатостью 2–4 балла (рис. 5).

В образцах 4, 5 и 6 БМУ отсутствуют, однако в осевой зоне образца 4 наблюдается существенная полосчатость в виде неравномерно чередующихся сплошных перлитных и ферритных полос с разнотернистостью до 4-х номеров, связанная, по-видимому, с ликвацией. В образцах 5 и 6 полосчатость развита несущественно – 1.0–1.5 балла. В образцах 7 и 8 обра-

зуются БМУ размером до 10–20 мкм и находится до 5% остаточного аустенита. Механические свойства образцов катанки в зависимости от температуры изотермической выдержки представлены на рис. 6. Повышение прочностных свойств при увеличении температуры изотермической выдержки выше 600–650°C связано с ростом БМУ.

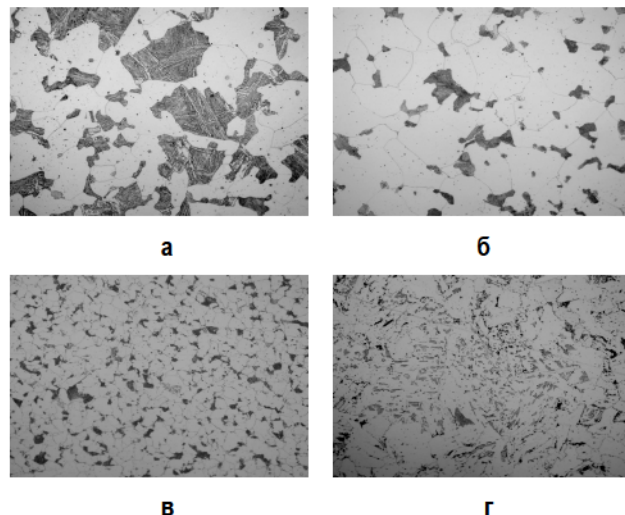


Рис. 5. Структура образцов катанки: а – образец 1, б – 4, в – 5, г – 7; $\times 500$

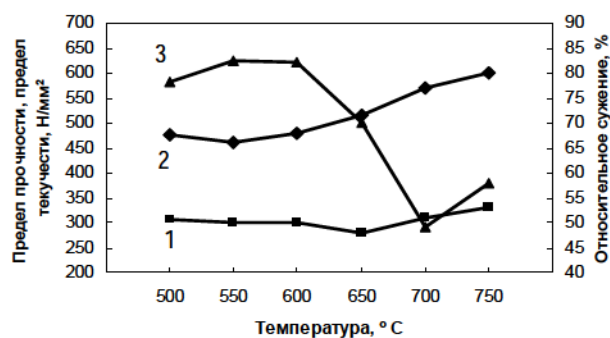


Рис. 6. Зависимость механических свойств катанки из стали Св-08Г2С с В от температуры изотермической выдержки: 1 – σ_t ; 2 – σ_b ; 3 – ψ

Таким образом, использование в процессе охлаждения катанки из борсодержащей стали Св-08Г2С изотермической выдержки в интервале температур 550–600°C в течение 20–30 мин способствует формированию ферритно-перлитной структуры без БМУ и высокого комплекса механических свойств ($\sigma_b \leq 500$ МПа; $\psi \geq 75\%$), что достаточно для безотжигового волочения в сварочную проволоку.

Список литературы

1. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.Н. Превращение в железе и стали. М.: Наука, 1977. 235 с.
2. Пикеринг Ф.Б. Физическое материаловедение и разработка сталей. М.: Металлургия, 1982. 182 с.
3. Голованенко С.А., Фонштейн Н.М. Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1986. 207 с.
4. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки/А.Б. Сычков, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов, И.Н. Чуйко. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.

5. Структурообразование в катанке из легированных сталей сварочного назначения / В.В. Парусов, И.Н. Чуико, О.В. Парусов, М.Ф. Евсюков, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008. № 6. С. 47–49.
6. Оценка технологичности переработки катанки из легированных сталей сварочного назначения на метизном переделе / В.В. Парусов, И.Н. Чуико, О.В. Парусов, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин, С.Ю. Жукова // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. Днепропетровск: ПГАСА. 2009. Вып. 48. Ч. 2. С. 8–11.
7. Нестеренко А.М., Сычков А.Б., Жукова С.Ю. Исследование причин разрушения при волочении катанки-проволоки из стали Св-08Г2С // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. № 6. С. 60–63.
8. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Боросодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
9. Frank A. R., Kirkcaldy A. The effect of boron on the properties of electric arc-sourced plain carbon wire drawing qualities // Wire Journal International. 1998. № 5. P. 100–113.
10. North Star Steel Texas's experience with boron additions to low-carbon steel / B. Yalamanchili, J. Nelson, P. Power, D. Lanham // Wire Journal International. 2001. № 11. P. 90–94.
11. Новое применение бора в металлургии / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2005. № 1(9). С. 15–17.
- Metallurgy, 1986. 207 p.
4. Structure and properties of wire rod for the manufacture of electrodes and welding wire / A.B. Sychkov, V.V. Parusov, A.M. Nesterenko, S.U. Zhukova, M.A. Zhigarev, A.B. Perchatkin, A.B. Peregudov, I.N. Chuiko // Benders: Polygraphist., 2009. 608 p.
5. Structure formation in the wire rod from alloyed steels welding purposes / V.V. Parusov, I.N. Chuiko, O.V. Parusov, M.F. Yevsyukov, A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev, A.V. Perchatkin. Metallurgical and Mining Industry. 2008. № 6. С. 47–49.
6. Evaluation of technological processing of welding purpose wire rod from alloyed steels in hardware redistribution / V.V. Parusov, I.N. Chuiko, O.V. Parusov, A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev, A.V. Perchatkin, S.U. Zhukova // Construction, materials engineering, mechanical engineering: Collection of scientific papers Dnepropetrovsk: PGASA. , 2009. No. 48. Part 2. p. 8–11.
7. Nesterenko AM, Sychkov AB, Zhukova SU Investigation of the causes of the destruction during drawing of wire rod from steel Sv-08G2S. Metallurgical and Mining Industry. 2006. № 6. p. 60–63.
8. Lyakishev NP, Pliner UL, Sl Lappo Boron-containing steels and alloys. Moscow: Metallurgy, 1986. 192 p.
9. Frank A.R., Kirkcaldy A. The effect of boron on the properties of electric arc-sourced plain carbon wire drawing qualities // Wire Journal International. 1998. № 5. P. 100–113.
10. North Star Steel Texas's experience with boron additions to low-carbon steel / B. Yalamanchili, J. Nelson, P. Power, D. Lanham // Wire Journal International. 2001. № 11. P. 90–94.
11. A new application of boron in steel. V.V. Parusov, A.B. Sychkov, I.V. Derevyanchenko, M.A. Zhigarev. Magnitogorsk: Journal of Magnitogorsk State Technical University. 2005. № 1(9) P 15–17.

Bibliography

УДК 621.882:539.4.011.25

Герасимов В.Я., Парышев Д.Н., Герасимова О.В.

СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАКРУЧИВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ

Выполнена вероятностная оценка изменения временного сопротивления и коэффициента закручивания для высокопрочных болтов М22. Сравнение кривых теоретического и эмпирического распределения контролируемых параметров позволяет сделать вывод о возможности уменьшения количества болтов при их механических испытаниях от 36 до 26%.

Ключевые слова: высокопрочные болты, временное сопротивление, коэффициент закручивания, кривые распределения.

Probabilistic assessment of change of temporary resistance and twisting coefficient for high-strength bolts M 22 is carried out. Comparison of curves of theoretical and empiric distribution of controlled parameters lets us make a conclusion on probability to reduce the number of bolts at their mechanical testing from 36 to 26%.

Key words: high-strength bolts, temporary resistance, twisting coefficient, distribution curves.

В работе [1] показана взаимосвязь между основными характеристиками – временным сопротивлением σ_B и электропроводностью J металла, полученными для высокопрочных болтов М 22 из стали 40Х. В соответствии с хорошим согласованием для указанных характеристик можно применять оценку распределения других характеристик в вероятностном поле.

При силовом нагружении резьбовых изделий «болт – гайка» важной эксплуатационной характеристикой является коэффициент закручивания K , величина которого зависит от силы затяжки и диаметра резьбы (согласно ГОСТ Р 52643-2006).

В данном исследовании выполнена вероятностная оценка изменения временного сопротивления и коэффициента закручивания для высокопрочных болтов М 22. При этом определяются следующие параметры распределения: выборочное среднее и среднее квадратическое отклонение с учетом объема выборки [2].

Для построения теоретической кривой необходимо найти значения функции распределения в основных диапазонах.

Для эмпирической кривой распределения можно применять метод группировки с определением числа наблюдений n_i для каждого из шести диапазонов с определением их ширины по формуле $R=\Delta X/6$.

Для временного сопротивления получены следующие значения параметров распределения в логарифмических координатах: $a_t=3,094$; $\sigma_t=0,0082$; $R=0,0049$. Кривые теоретического и эмпирического распределения показаны на **рис. 1**. В целом получено хорошее согласование кривых с наибольшим заполнением вероятностного поля в основном диапазоне – до 64%.

Аналогичным образом выполнена статистическая обработка опытных данных для коэффициента закручивания. В этом случае получены следующие значения вероятностных параметров: $a = 0,169$; $\sigma = 0,0085$; $R=0,0058$; $y_0 = 47$; $y_1 = 28,2$; $y_2 = 6,60$. Кривые 1 и 2 теоретического и эмпирического распределения показаны на **рис. 2**. При этом эмпирическая кривая располагается ниже теоретической кривой, что согласуется с **рис. 1** для временного сопротивления.