

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, с. н. с. А. И. Бабаченко (Украина); д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина).

Поступила в редколлегию 15.06.2016

Принята к печати 16.06.2016

УДК 669-151.64

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА В МЕЖКРИТИЧЕСКИЙ ИНТЕРВАЛ ТЕМПЕРАТУР НА ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

ТКАЧ Т. В., *м. н. с.*

Кафедра металловедения и термической обработки металлов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

Аннотация. Постановка проблемы. Широко используемый толстолистовой прокат из низкоуглеродистых сталей не в полной мере соответствует предъявляемым к нему требованиям по механическим свойствам. Это обуславливает необходимость применения дополнительных термообработок, повышающих недостаточно высокие показатели вязкости, получаемые при случайных отклонениях от штатной технологии. Используются методы: количественной и качественной световой металлографии, электронной микроскопии. **Цель работы** – разработать режим термообработки, позволяющий повысить или исправить низкий комплекс механических свойств на основе анализа влияния параметров нагрева в межкритическом интервале температур на структуру и свойства низкоуглеродистых низколегированных сталей. **Результаты.** Исследовано влияние термических обработок по различным режимам нагревов в интервале $A_{c1}...A_{c3}$ на фазово-структурные превращения в сталях 09Г2С и 10Г2ФБ. Предложен режим температурной обработки: нагрев до температур 820...770 °С, выдержка 1 час с последующим охлаждением, позволяющий повысить механические свойства листов после контролируемой прокатки за счет формирования структуры с содержанием до 45 % феррита со сверхмелким зерном (до 1 мкм). **Практическая значимость.** На основании анализа результатов исследований предложен режим, позволяющий повышать или исправлять «выпады», в частности, по пластическим свойствам, полученным при случайных отклонениях в процессе контролируемой прокатки.

Ключевые слова: низкоуглеродистые низколегированные стали; толстолистовой прокат; термическая обработка; межкритический интервал температур; микроструктура; сверхмелкое зерно

ВПЛИВ НАГРІВУ В МІЖКРИТИЧНИЙ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР НА ФАЗОВО-СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

ТКАЧ Т. В., *м. н. с.*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

Анотація. Постановка проблеми. Широко використовуваний товстолистовий прокат з низьковуглецевих сталей не повною мірою відповідає висунутим до нього вимогам щодо механічних властивостей. Це зумовлює необхідність застосування додаткових термообробок, що підвищують недостатньо високі показники в'язкості, одержувані у разі випадкових відхилень від штатної технології. **Методика.** Використано методи кількісної та якісної світлової металографії, електронної микроскопії. **Мета роботи** – розробити режим термообробки, що дозволяє підвищити або виправити низький комплекс механічних властивостей на основі аналізу впливу параметрів нагріву в міжкритичному інтервалі температур на структуру і властивості низьковуглецевих низколегованих сталей. **Результати.** Досліджено вплив термічних обробок за різними режимами нагріву в інтервалі $A_{c1}...A_{c3}$ температур на фазово-структурні перетворення в сталях 09Г2С і 10Г2ФБ. Запропоновано режим температурної обробки: нагрів до температур 820...770 °С, витримка 1 годину з подальшим охолодженням, що дозволяє підвищити механічні властивості листів після контрольованої прокатки за рахунок формування структури з вмістом до 45 % фериту з наддрібним зерном (до 1 мкм). **Практична значимість.** На підставі аналізу результатів досліджень запропоновано режим, що дозволяє підвищувати або виправляти «випади», зокрема, за пластичними властивостями, отриманими у разі випадкових відхилень у процесі контрольованої прокатки.

Ключові слова: низьковуглецеві низьколеговані сталі; товстолистовий прокат; термічна обробка; міжкритичний інтервал температур; мікроструктура; наддрібне зерно

INFLUENCE OF HEATING IN THE INTERCRITICAL TEMPERATURE INTERVAL ON PHASE-STRUCTURAL TRANSFORMATIONS AND MECHANICAL PROPERTIES OF LOW-CARBON STEELS

ТКАЧ Т.В., *junior researcher*

Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0757-2277

Abstract. The widely used plate iron low-carbon steels does not fully comply with the qualifying standards for mechanical properties. This makes it necessary the use of additional heat treatments, which increase is not enough high indicators toughness obtained, when random deviations from the standard technology. **Methodology.** The methods: qualitative and quantitative light metallography, electron microscopy. **The purpose** is to develop a economical heat treatment mode, which allows enhance the complex mechanical properties by analyzing effect of heating parameters in the intercritical temperature interval on the structure and properties of low-carbon low-alloy steels. **Results.** It is investigated the effect of heat treatments on the various modes of heating in the interval $Ac_1 \dots Ac_3$ on the phase-structural transformations in steels and 09Mn2Si 10Mn2VNb. Heat treating mode has been proposed: heating to temperatures of 820 ... 770 °C, excerpt 1 hour followed by cooling, allowing to enhance the mechanical properties of the sheets after controlled rolling by forming a structure containing up to 45 % of ultrafine grain ferrite (up to 1 micron). **Practical value.** Based on the analysis of research results proposed regime which allows to increase low figures of plastic properties, obtained by random deviations in the process of controlled rolling.

Keywords: low-carbon low-alloy steel; plate iron; heat treatment; the intercritical temperature interval; microstructure; ultrafine grain

Введение

Прокат из строительных сталей является наиболее массовым видом готовой продукции. Толстолистовой прокат из низколегированных сталей, изготавливаемый по технологии горячей прокатки, не в полной мере соответствует предъявляемым к нему требованиям по механическим свойствам. Это обуславливает необходимость разработки новых и корректировки действующих температурно-деформационных режимов прокатки, а также применения дополнительных термообработок, повышающих недостаточно высокие показатели вязкости, получаемые при непредвиденных отклонениях от штатной технологии.

Одним из способов повышения ударной вязкости и снижения температуры хрупко-вязкого перехода без снижения прочности проката из низкоуглеродистых низколегированных сталей является измельчение ферритного зерна, которое может быть достигнуто применением термической обработки. Наиболее распространенными способами термических обработок, используемых для этих целей, являются нормализация в γ -области и закалка из межкритического интервала температур с последующим высоким отпуском [1–3]. Изучением закалки из двухфазной области занимались известные ученые, такие как Л. И. Гладштейн, В. Д. Садовский, Б. Г. Сазонов, А. Н. Маковецкий и др. [4–11]. Такая комплексная обработка является многоступенчатой и дорогостоящей операцией.

Цель работы – рассчитать режим термообработки, позволяющий повысить или исправить низкий комплекс механических свойств на основе анализа влияния параметров нагрева в межкритическом интервале температур (МКИТ) на структуру и свойства низкоуглеродистых низколегированных сталей.

Материал и методики исследований

Материалом исследования служили низкоуглеродистые низколегированные стали 09Г2С и 10Г2ФБ, применяемые в строительной индустрии и для изготовления труб магистральных нефте- и газопроводов.

Образцы размерами 18×15×11 мм вырезали из листов толщиной 18 мм, прокатанных по технологии контролируемой прокатки, и подвергали лабораторным термическим обработкам по следующим режимам:

- нагрев и выдержка в межкритическом интервале температур (МКИТ);
- двухступенчатый нагрев – в γ -область + снижение температуры и выдержка в МКИТ;
- нагрев в γ -область.

Образцы нагревали вместе с печью, выдерживали их при заданной температуре и охлаждали на воздухе, средняя скорость охлаждения составляла 5 °C/с. При двухступенчатом нагреве после выдержки при температуре γ -области последующее охлаждение до межкритического интервала температур

осуществляли вместе с печью, а после выдержки в МКИ – на воздухе. Параметры режимов обработки образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы термообработки образцов сталей 09Г2С и 10Г2ФБ / Regimes of heat treatment 09G2S and 10G2FB steel

Номер режима	Первый нагрев		Второй нагрев	
	<i>T</i> нагрева, °С	Длит. выдержки, ч	<i>T</i> нагрева, °С	Длит. выдержки, ч
1	770	1	–	–
2	810	2	–	–
3	950	1	790	1
4	950	1	790	0,5
5	950	1	–	–

Оценивали влияние температуры нагрева и длительности выдержки на структурные превращения в стали. Структуру исследовали количественными и качественными методами световой металлографии, электронной микроскопии (на растровом электронном микроскопе ЭМ106И). Величину зерна определяли по стандартной методике согласно ГОСТ 5639-82 и на основании полученных данных построили гистограммы, отображающие размер зерна феррита в мкм.

Металлографические шлифы готовили вначале по традиционной схеме, затем после механической шлифовки для выявления границ мелких зёрен подвергали электролитической полировке в хлорноуксусном электролите в течение 2 минут, затем травили в 2 % растворе азотной кислоты в этаноле. Изображения фиксировали цифровой камерой на микроскопе Неофот-2 с иммерсионным объективом при увеличении × 1 250.

Результаты исследований и их обсуждение

В лабораторных экспериментах установлено, что в зависимости от режима термической обработки структурные превращения в обеих сталях развиваются следующим образом (иллюстрационный материал приведен для стали 09Г2С – рис. 1).

При нагреве стали до МКИТ в перлитных колониях возникают зародыши аустенита, число и средние размеры которых близки размерам и объему перлитных колоний. Поскольку в исходном состоянии (после горячей прокатки) в образцах существует неоднородность структуры (перлитная полосчатость), то после нагрева в МКИТ перлитные колонии и полосы превращаются в аустенитные, с очень мелким зерном, так как в каждой колонии имеются свои потенциальные зародыши, то есть

кристаллографические варианты ориентационных соотношений феррит – цементит. Именно они определяют ориентацию решётки, а количество вариантов этих соотношений – количество и соответственно размеры будущего зерна аустенита к моменту завершения превращения перлит → аустенит.

Во время последующей выдержки при возрастания температуры выше A_{c1} зёрна аустенита, расположенные в окружении бывших колоний перлитной полосы, некоторое время (около 30 мин), остаются мелкими, а та часть аустенитных зёрен, которые соседствуют с ферритными, увеличиваются в размерах, но замедленно, так как при этом требуется время для выравнивания концентрации углерода между аустенитом с $\approx 0,8\%$ С и ферритом с $\approx 0,02\%$ С. Естественно, что как количество феррита, который превращается в аустенит, так и объёмное соотношение между γ - и α -фазами зависят от выбранной температуры нагрева, если она будет достаточно долго оставаться неизменной для установления относительно устойчивого равновесия.

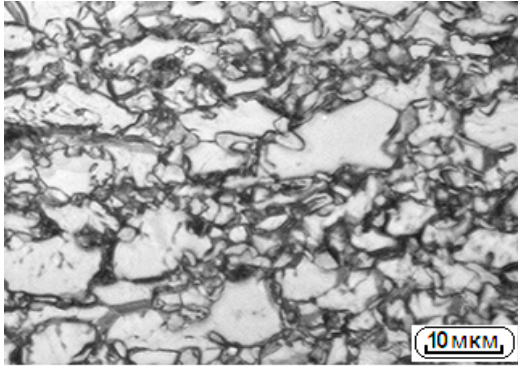
При охлаждении низкоуглеродистой стали распад аустенита с концентрацией углерода в нем, соответствующей $C_{\gamma_{МКИ}}$ (табл. 2), начинается с повторного образования зёрен избыточного феррита, которые зарождаются в тех аустенитных зернах, которые возникли непосредственно перед началом охлаждения и имеют пониженную концентрацию углерода $C'_{\gamma_{МКИ}} \leq C_{\gamma_{МКИ}}$. Это значит, что границы аустенита, которые при нагреве “поедали” феррит, начинают двигаться в обратную сторону при охлаждении [12]. Этот процесс происходит с большой скоростью, так как при понижении температуры увеличивается движущая сила, которая способствует восстановлению некоторых участков в зернах феррита.

После окончания восстановления феррита, в сравнительно мелких зёрнах остаточного аустенита начинается образование мелких зерен феррита, а затем и цементита. Изменения структуры в зависимости от температуры и времени выдержки показаны на рисунке 1, а расчет размера ферритного зерна – на рисунке 2.

Таблица 2

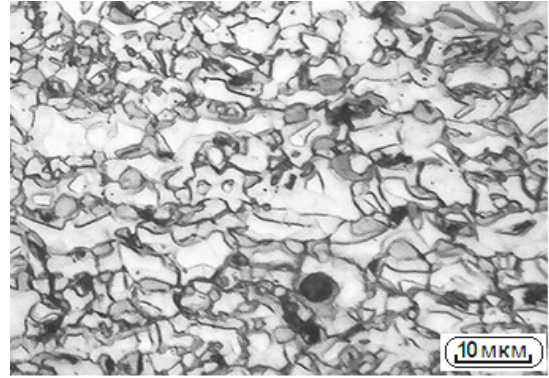
Расчетные данные количества фаз γ и α и концентрации углерода в них в зависимости от температуры нагрева для стали 09Г2С/ Calculated data the number of phases α and γ and the concentration of carbon in them, depending on the heating temperature for the steel 09G2S

<i>t</i> , °С	γ , %	C_{γ} , %	α , %	C_{α} , %
950	100	0,1	0	0
810	19	0,45	81	0,013
790	17	0,52	83	0,014
770	14	0,6	86	0,016



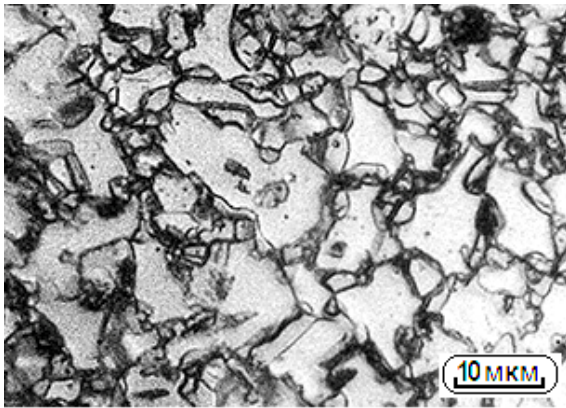
a

Нагрев до 770 °C; выдержка – 1 час / Heating to 770 °C; excerpt – 1 hour



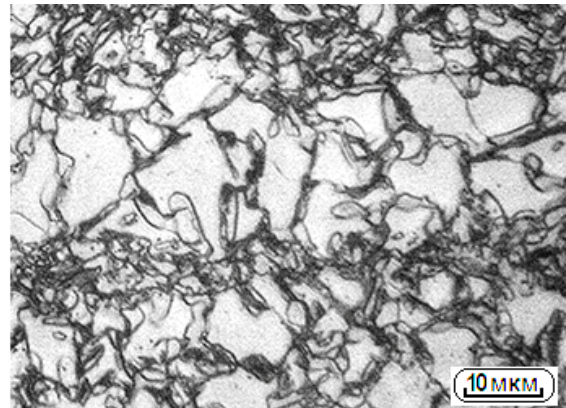
б

Нагрев до 810 °C; выдержка – 2 часа / Heating to 810 °C; excerpt – 2 hours



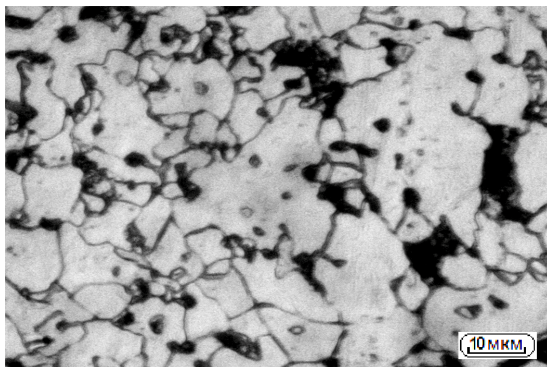
в

*Нагрев до 950 °C, выдержка – 1 час +
нагрев до 790 °C, выдержка – 1 час /
Heating to 950 °C; excerpt – 1 hour +
Heating to 790 °C; excerpt – 1 hour*



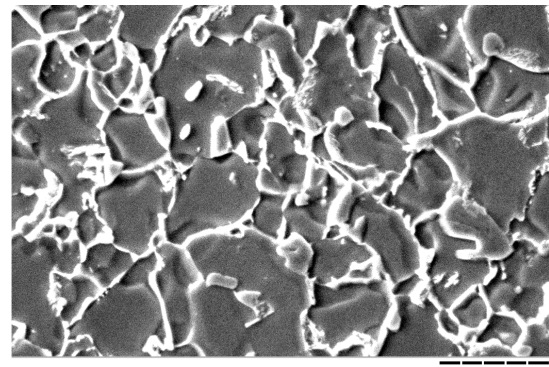
г

*Нагрев до 950 °C; выдержка – 1 час +
нагрев до 790 °C; выдержка – 0,5 часа /
Heating to 950 °C; excerpt – 1 hour +
Heating to 790 °C; excerpt – 0,5 hour*



д

*Нагрев до 950 °C; выдержка – 1 час /
Heating to 950 °C; excerpt – 1 hour*



е

*Нагрев до 950 °C; выдержка – 1 час +
нагрев до 790 °C; выдержка – 0,5 часа /
Heating to 950 °C; excerpt – 1 hour +
Heating to 790 °C; excerpt – 0,5 hour*

Рис. 1. Микроструктура стали 09Г2С после термических обработок / Fig. 1. The microstructure of the steel 09G2S after heat treatments

Режим 1. Температура нагрева 770 °С, выдержка 1 час. При переходе температуры через линию PS перлит превращается в аустенит, концентрация углерода в котором при A_{c1} достигает 0,8 %; а с повышением температуры до 770 °С определенное количество феррита с (концентрацией 0,002 %) превращается в аустенит, при этом значительная часть феррита не участвует в $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ фазовой перекристаллизации.

В результате повышения температуры концентрация углерода в γ -фазе снижается с 0,8 до $\approx 0,6$ %, а в α -фазе – повышается от 0,002 % до 0,016 % (для стали 09Г2С). При последующем охлаждении на воздухе происходит распад аустенита на феррит и цементит. Между полос непереращенного феррита (с размером зерна до 12 мкм) образуется смесь цементита и сверхмелких зерен феррита (размерами до 1 мкм) в количестве около 45 % (рис. 1 а).

Режим 2. Температура нагрева 810 °С, выдержка 2 часа. С увеличением температуры нагрева до 810 °С и времени выдержки до 2 часов увеличивается количество аустенита в результате превращения некоторой дополнительной части α -фазы в γ -фазу; изменяется концентрация углерода – в феррите она снижается до 0,013 %, а в аустените – до $\approx 0,45$ %. Повышение температуры нагрева в МКИ и увеличение выдержки вносит изменения в конечную структуру стали: количество сверхмелких зерен феррита уменьшается до 35 % (рис. 2). Так как при температуре 810 °С количество вторично образовавшегося феррита меньше, чем при температуре 770 °С (режим 1), и выдержка продолжительнее, зерна α -фазы имеют большие диффузионную и концентрационную возможности роста до размеров 3...6 мкм. Далее происходит диффузия углерода и марганца на границы и в аустенитные пространства между ферритными зёрнами, где образуется перлит в виде мелких искажённых колоний или даже отдельных частиц цементита. После двухчасовой выдержки практически устраняется текстура прокатки и снижается ликвационная неоднородность стали (рис. 1 б).

При нагреве и выдержке выше точки A_{c3} формируется равновесная структура аустенита, который при охлаждении до температур МКИ ($t_{\text{МКИ}}$) частично распадается с образованием феррита, количество которого зависит от выбранной температуры, при этом γ -фаза обогащается углеродом до содержания, соответствующего $S_{\gamma_{\text{МКИ}}}$ (табл. 2). Чем ниже выбранная температура нагрева в МКИ, тем большее количество зерен феррита выделится.

Режим 3. Ступенчатая обработка по схеме: нагрев до температуры 950 °С, выдержка 1 час; снижение температуры до 790 °С, выдержка 1 час. Нагрев стали в γ -область, а затем понижение температуры до МКИ приводит к увеличению размера зерна феррита в среднем до 14 мкм (рис. 2) и

снижению (до 20 %) количества сверхмелких зерен. После увеличения выдержки текстура прокатки не наблюдается.

Режим 4. Ступенчатая обработка по схеме: температура нагрева 950 °С, выдержка 1 час; снижение температуры до 790 °С, выдержка 30 мин. При уменьшении выдержки в МКИ увеличивается количество сверхмелких зерен вторично выделившегося феррита, в среднем до 35 % (рис. 2). При этом увеличивается максимальный размер зерна феррита (≈ 14 мкм) по сравнению с однократной обработкой в межкритическом интервале температур. В конечной структуре наблюдается перлитная полосчатость 2...3 балла (рис. 1 з).

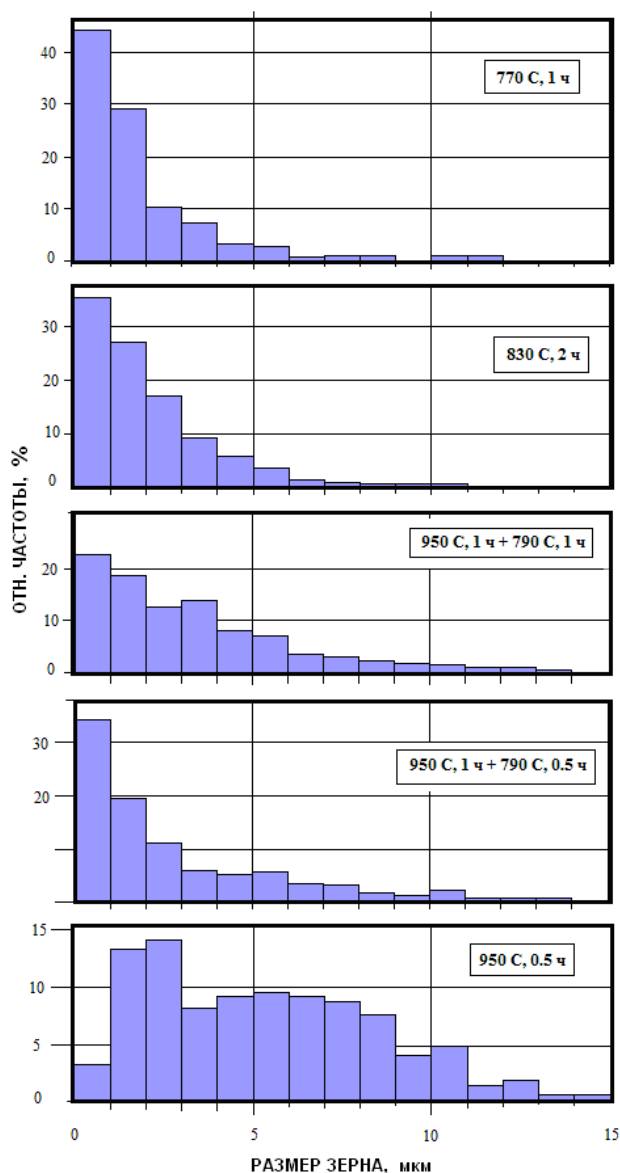


Рис. 2. Величина зерна в стали 09Г2С после разных термических обработок /

Fig. 2. The grain size in steel 09G2S after different heat treatments

Режим 5. Температура нагрева 950 °С, выдержка 1 час. При нагреве в аустенитной области формируется равновесная структура аустенита, который распадается на феррит и цементит. Так как первым начинается зарождение феррита на границах более крупных зерен аустенита (по сравнению с аустенитом в МКИТ), то и образовавшиеся зерна феррита крупнее (рис. 1 д). Цементит, зарождающийся в последних мелких разрозненных порциях аустенита (пересыщенного углеродом), не формирует «регулярных» колоний перлита, так как для этого нет достаточного пространства. После такой обработки зерна феррита в структуре стали достигают размеров 15...25 мкм (рис. 2).

После термической обработки в двухфазной области по различным режимам и медленного охлаждения на полученных снимках наблюдается бимодальное распределение размеров зерна феррита (рис. 1 а–е). Наличие сверхмелких зерен феррита размерами 1...3 мкм и более крупных до 15 мкм подтверждается гистограммами, представленными на рисунке 2.

Выводы

1. Исследовано влияние термических обработок по различным режимам нагревов в МКИТ на формирование структуры низкоуглеродистых низколегированных сталей 09Г2С и 10Г2ФБ.

2. Установлено, что после нагрева указанных сталей в межкритическом интервале при температуре 770 °С, выдержке 1 час и охлаждении на воздухе в их структуре образуется до 45 % сверхмелкого зерна феррита размерами до 1 мкм.

3. Повышение температуры нагрева до 810 °С и увеличение времени выдержки в МКИ до 2 часов способствует снижению количества сверхмелких зерен феррита до 35 % и некоторому увеличению их размеров (до 3...6 мкм).

4. Ступенчатая термическая обработка, заключающаяся в аустенитизации и последующей выдержке в МКИ, способствует снижению (до 20 %) количества сверхмелких зерен феррита и увеличению их размеров в среднем до 15 мкм.

5. На основании полученных результатов предложен режим термической обработки низкоуглеродистых низколегированных сталей: нагрев до температур МКИ 820...770 °С, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе, позволяющий повысить механические свойства листов после контролируемой прокатки за счет формирования структуры с содержанием до 45 % феррита со сверхмелким зерном (до 1 мкм). Предложенный режим позволяет повышать механические свойства и исправлять «выпады» по пластическим свойствам, полученные при случайных отклонениях температуры и деформации в процессе контролируемой прокатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Горбатенко В. П. Особливості структуроутворення високоміцних будівельних сталей під час контрольованої прокатки та наступної термічної обробки / В. П. Горбатенко, А. В. Лукін // *Металеві конструкції*. – 2010. – № 2. – Т. 12. – С. 113–121.
- Особенности формирования перлитной полосчатости в толстолистовой стали 10Г2ФБ / В. И. Большаков, Г. М. Воробьев, И. А. Тютюрев, Ю. И. Хоменко // *Металознавство та термічна обробка металів*. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2005. – № 1. – С. 1–10.
- Исследование влияния режимов термообработки на качество проката из конструкционных низколегированных сталей марок 26Г2СБА и 25ХГМНТБА / Л. П. Казанский, В. Л. Сивков, Л. М. Бистина // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева*. – 2013. – № 5 (102) – С. 340–345. – Режим доступа: <http://www.nntu.ru/trudy/2013/05/340-345.pdf>
- Марченко Б. А. Закалка сталей от межкритических температур / Б. А. Марченко // *МиТОМ*. – Киев. – 1985. – № 3. – С. 57.
- Гладштейн Л. И. Кинетика полиморфного превращения в ферритно-перлитных сталях при нагреве в межкритическом интервале температур / Л. И. Гладштейн, Т. Н. Риваненок // *Сталь*. – 2008. – № 4. – С. 64–68.
- Сазонов Б. Г. Влияние вторичной закалки из межкритического интервала на склонность стали к обратимой отпускной хрупкости / Б. Г. Сазонов // *МиТОМ*. – Киев. – 1957. – № 4. – С. 31–34.
- Дьяченко С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко // *Москва : Металлургия*, 1982. – 127 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1033366/>
- Шейн А. С. Структура и ударная вязкость стали, закаленной из критического интервала / А. С. Шейн, Т. А. Лебедев // *Термическая обработка металла*. – Свердловск : Машгиз, 1950. – С. 166–177.
- Околович Г. А. Межкритическая закалка / Г. А. Околович, А. Е. Сизова, Т. В. Мустафина // *Ползунковский вестник*. – 2012. – № 1/1. – С. 228–231.
- Маковецкий А. Н. Роль предварительной термической обработки в формировании структуры и свойств трубных сталей после закалки из межкритического интервала температур / А. Н. Маковецкий, Д. А. Мирзаев // *Вестник ЮУрГУ*. – 2012. – № 39. – С. 71–78. – Режим доступа : <http://dspace.susu.ru/xmlui/handle/0001.74/2274?show=full>
- Влияние температуры нагрева на формирование субзеренной структуры в предварительно закаленных низколегированных сталях / С. В. Беликов, К. И. Сергеев, М. С. Карабаналов и др. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 2. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8873>
- Экспериментальное определение удельных объемов фаз в межкритическом интервале температур при термической обработке низкоуглеродистых сталей / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Т. В. Ткач, В. Д. Лаухин // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. – 2015. – Вып. 80 – С. 72–78.

REFERENCES

1. Gorbatenko V.P. and Lukhin A.V. *Osoblivosti strukturoutvorenniya visokomitsnikh budivel'nikh staley pid chas kontrol'ovanoi prokatki ta nastupnoi termichnoi obrobki* [Features of high construction steel structure during the controlled rolling and the subsequent heat treatment]. *Metalevi konstrukzii* [Metal Constructions]. 2010, no. 2, vol. 12, pp. 13–121. (in Ukrainian).
2. Bol'shakov V.I., Vorob'yev G.M., Tyuterev I.A. and Khomenko Yu.I. *Osobennosti formirovaniya perlitnoy poloschatosti v tolstolistovoy stali 10G2FB* [Features of formation pearlite banding in iron plate 10G2FB] *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. Dnipropetrovsk : PSACEA Publ., no. 1, 2005, pp. 1–10. (in Russian).
3. Kazanskiy L.P., Sivkov V.L. and Bistina L.M. *Issledovanie vliyaniya rezhimov termoobrabotki na kachestvo prokata iz konstruksionnykh nizkolegirovannykh staley marok 26G2SBA i 25KhGMNTBA* [Investigation of influence of of heat treatment on the quality of rolled low-alloy steels and 26G2SBA 25HGMNTBA] *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alekseeva]. 2010, no. 5 (102), pp. 340–345. (in Russian).
4. Marchenko B.A. *Zakalka staley ot mezhkriticheskikh temperatur* [Hardening steels from the intercritical temperature] // *MiTOM* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. Kyev, 1985, no. 3, pp. 57. (in Russian).
5. Gladshstein L.I. and Rivanenko T.N. *Kinetika polimorfnoho prevrashcheniya v ferrito-perlitnykh stalyakhv pri nagreve v mizhkriticheskom intervale temperatur* [The kinetics of polymorphic transformation in ferritic-pearlitic steel during heating in the intercritical temperature interval]. *Stal'* [Steel]. 2008, no. 4, pp. 64–68. (in Russian).
6. Sazonov B.G. *Vliyanie vtorichnoi zakalki iz mezhkriticheskogo intervala na sklonnost' stali k obratimoi otpusknoi khрупkosti* [Influence of secondary hardening of the intercritical interval on the propensity of steel to reversible temper brittleness]. *MiTOM* [Metallurgy and heat treatment of metals]. Kyev, 1957, no. 4, pp. 31–34. (in Russian).
7. D'yachenko S.S. *Obrazovanie austenita v zhelezouglerodistykh splavakh* [Formation of austenite in the iron-carbon alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1982, 127 p. (in Russian).
8. Shein A.S. and Lebedev T.A. *Struktura i udarnaya vyazkost' stali, zakalenoii iz kriticheskogo intervala* [The structure and toughness of steel, hardened of critical interval]. *Termicheskaya obrabotka metalov* [Heat treatment of metals]. Sverdlovsk : Mashgiz Publ., 1950, pp. 166–177. (in Russian).
9. Okolovich G.A., Sizova A.E. and Mustafina T.V. *Mezhkriticheskaya zakalka* [Intercritical hardening]. *Polzunkovsky vestnik* [Polzunkovsky Bulletin]. 2012, no. 1/1, pp. 228–231. (in Russian).
10. Makovetskii A.N. and Mirzaev D.A. *Rol' predvaritel'noi termicheskoi obrabonki v formirovanii struktury I svoistv trubnykh staley posle zakalki iz mezhkriticheskogo intervala temperatur* [The role of thermal pretreatment in determining the structure and properties of the pipe steel after hardening of intercritical temperature interval]. *Vestnik YuUrGU* [Bulletin YuUrGU]. 2012, no. 39, pp. 71–78. (in Russian).
11. Belikov S.V., Sergeev K.I. and Karabanalov M.S. *Vliyanie temperatury nagreva na formirovanie subzerennoi struktury v predvaritel'no zakalennykh nizkolegirovannykh stalyakh* [Effect of heating temperature on the formation of subgrain structure in the pre-hardened alloy steels]. *Sovremenyie problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013, no. 2. (in Russian).
12. Bol'shakov V.I. Suhomlin G.D., Tkach T.V. and Laukhin V.D. *Eksperimentalnoe opredelenie udelnykh ob'yomov faz v mezhkriticheskom intervale temperatur pri termicheskoy obrabotke nizkouglerodistykh staley* [Experimental determination the specific volumes of phases in the intercritical temperature interval during the heat treatment of low-carbon steels]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Civil Engineering. Materials Science. Machine Building]. 2015, vol. 80, pp. 72–78. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлином (Украина); д-ром техн. наук, доц. В. Н. Волчуком (Украина)

Поступила в редколлегию 18.09.2016.

Принята к печати 20.09.2016.