

ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЫШЕННОГО КОМПЛЕКСА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ СТУПЕНЧАТОЙ ЗАКАЛКОЙ

Двухфазные феррито-мартенситные стали в силу высокой пластичности и низкого предела текучести первоначально предназначались для изделий, получаемых холодным формоизменением (штамповкой, прессованием и др.) [1–3]. Исследование возможности целенаправленного повышения прочностных характеристик путем регулирования количества и свойств упрочняющей фазы (мартенсита, бейнита) при сохранении на требуемом уровне вязко-пластических характеристик за счет мягкого феррита показало перспективность использования гетерофазных низкоуглеродистых сталей, взамен феррито-перлитных, как конструкционного материала. Сегодня они применяются, в частности, при производстве листа, штрипса, газо- и нефтепроводных труб повышенных классов прочности [3; 4].

Формирование гетерофазного состояния достигается легированием стали элементами, повышающими устойчивость переохлажденного аустенита (Mo, Cr, Ni), что приводит к их удорожанию, либо ускоренным охлаждением с прокатного или печного нагрева, либо нагревом в межкритический интервал температур и последующим охлаждением с заданной скоростью [1–4].

В данной работе рассматривается новый способ образования гетерофазной структуры – ступенчатая закалка, который может быть эффективен для широкого круга изделий из малоуглеродистых сталей. В его основе лежит дозированное формирование в низкоуглеродистой стали с исходной феррито-перлитной структурой участков высокоуглеродистого аустенита, который при последующем ускоренном охлаждении превращается в бейнит и мартенсит, окруженные зернами ранее образовавшегося феррита.

Целью настоящей работы явилось отыскание параметров ступенчатой закалки (температур аустенитизации и переохлаждения, продолжительности выдержки при переохлаждении), обеспечивающих высокий комплекс механических свойств низкоуглеродистых сталей благодаря формированию феррито-бейнитно-мартенситной структуры.

Материал и методики исследования

Материалом исследования являлись стали 20 и 09Г2С промышленных выплавов, химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 20 и 09Г2С, масс.%

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Al
20	0,18	0,467	0,21	0,014	0,01	0,005	0,05	0,01	0,025
09Г2С	0,09	1,52	0,58	0,013	0,02	0,012	0,05	0,013	0,029

Стали имели исходную феррито-перлитную структуру, полученную нормализацией от 900 °С. Термическая обработка образцов в виде планок 5,5x10x280 мм проводилась в печи СНОЛ 2.3.1,5/10. Одна часть образцов нагревалась до температуры 900 или 860 °С и после выдержки в течение 30 мин. подвергалась закалке в воде. Другая часть образцов после аустенизации при данных температурах переохлаждались на 680 °С с выдержкой различной длительности и закаливалась в воду.

Анализ микроструктуры проводился свето-оптический микроскопе «OLIMPUS JX51». Для выявления структуры шлифы подвергались травлению в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Тонкие фольги изучались на электронном микроскопе УЭМВ-100Л. Испытания на растяжение плоских образцов в виде планок 5,5x10x280 мм проводились со скоростью 10^{-3} с^{-1} на машине INSTRON. Напряжение усилия измерялось с помощью тензодатчика с максимальным усилием 50000 Н.

Результаты эксперимента и их обсуждение

После закалки от $T_A = 900 \text{ °С}$ ($\tau_A = 30 \text{ мин.}$) исследованные стали имеют высокую прочность (твердость $\sim 320 \text{ HV}$, $\sigma_B \approx 1200 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} \approx 1050 \text{ МПа}$) и низкие пластические характеристики ($\delta_{\text{общ}} \approx 9 \%$, $\delta_p \approx 2 \%$), так что основная задача нового способа термообработки состояла в повышении пластических характеристик, что неминуемо связано со снижением прочности.

Исследование параметров ступенчатой закалки показало, что механические свойства стали 20 и 09Г2С становятся наиболее чувствительными к переохлаждению на 680 °С в случае, когда температура аустенизации близка к A_{c3} , которая для обеих сталей составляла $\sim 850 \text{ °С}$. Это можно объяснить тем, что при низкотемпературной аустенизации существуют участки образовавшегося аустенита, которые обогащены углеродом, и содержание в них углерода повышается при выделении избыточного феррита в ходе изотермической выдержке при 680 °С [5].

Такой высокоуглеродистый аустенит при последующей закалке превращается в прочный мартенсит (бейнит). С повышением

продолжительности выдержки при 680 °С твердость мартенсита, как и содержание в нем углерода, возрастает, хотя относительное количество в структуре уменьшается вследствие все более глубокого выделения избыточного феррита. Это поставило задачу на отыскание оптимальной выдержки при переохлаждении, которая составила 5 мин. для стали 09Г2С и 20 мин. для стали 20, обладающей несколько большей устойчивостью аустенита.

После ступенчатой закалки по найденному режиму ($T_a = 860$ °С (30 мин.) + переохлаждение на $T_n = 680$ °С + закалка в воду) стали 20 и 09Г2С имеют высокий комплекс механических свойств: $\sigma_b \approx 700$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 430$ МПа, $\delta_{общ.} = 22$ %, $\delta_p = 14$ %. По сравнению с нормализованным состоянием, достигается повышение прочностных свойств на $\sigma_b \approx 260$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 100$ МПа, а относительное удлинение $\delta_{общ.}$ превышает уровень требований стандартов на горячекатаную продукцию (лист, профили, трубы и т.д.) большинства групп прочности, для которых относительное удлинение должно составлять величину не менее 12–14 %.

Светлооптические исследования показали (рис. 1а), что микроструктура обеих сталей после ступенчатой закалки по оптимальным режимам состоит из светлых зерен избыточного феррита размером 20–50 мкм, находящихся в контакте между собой, и разомкнутых округлых зерен размером 10–30 мкм, внутри которых сформировались игольчатые кристаллы мартенсита и бейнита. Площадь зерен упрочняющей фазы составляла 40–50 %.

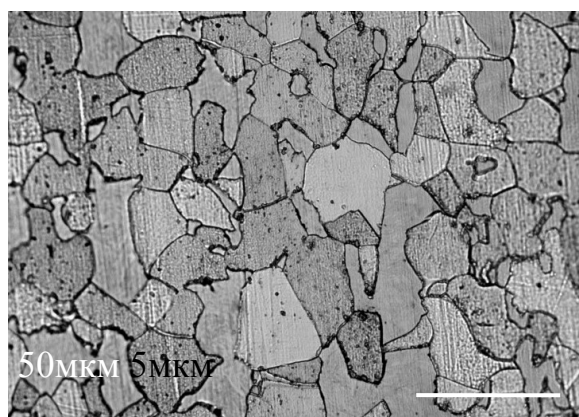
Электронно-микроскопические исследования на тонких фольгах стали 20 позволили конкретизировать эти заключения. В зернах избыточного феррита с плавно изогнутыми границами имеется повышенная плотность однородно распределенных дислокаций, несколько большая вблизи игольчатых кристаллов α -фазы (рис. 1б).

Обнаруживается мартенсит двух морфологических типов. Кристаллы мартенсита первого типа содержат столь высокую плотность дислокаций ($\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), что отдельные дислокации не разрушаются. Они имеют форму реек толщиной ~ 1 мкм, иногда собраны в пакеты (рис. 1в). Такой тип мартенсита характерен для среднеуглеродистых сталей [6].

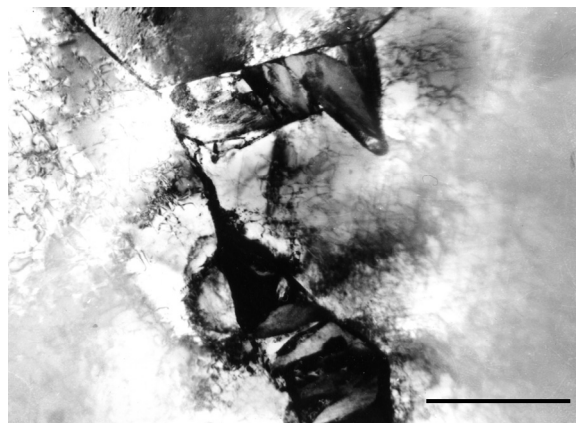
Широкие пластины мартенсита с пачками параллельных микродвойников толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$, характерны для высокоуглеродистого мартенсита (рис. 1г).

Рейки α -фазы с выделениями цементита в виде одинаково ориентированных частиц интерпретированы как нижний бейнит (рис. 1в). Ширина таких реек с несколькими изогнутыми границами достигает ~ 3 мкм.

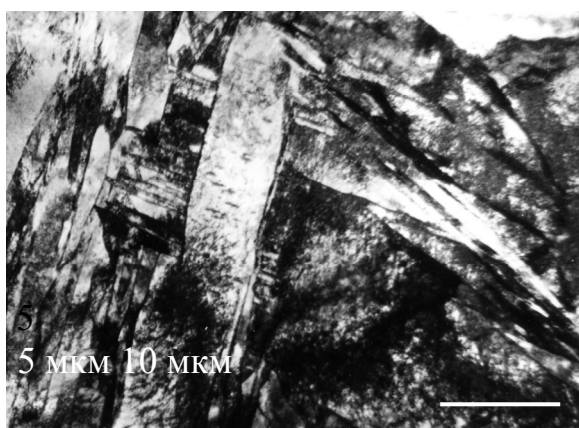
Анализ кольцевых электронограмм, полученных со всей облучаемой электронами области объекта, показал присутствие также остаточного аустенита. Однако однозначно идентифицировать его в структуре не удалось.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Микроструктура стали 20 после ступенчатой закалки по режиму:
 $T_a = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ (30 мин.) + $T_{\text{п}} = 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 мин.) + охлаждение в воде

Таким образом, данные электронной микроскопии показывают, что в низкоуглеродистой стали после ступенчатой закалки наряду с ферритом присутствует спектр сдвиговых продуктов превращения, формирующихся поочередно по мере понижения температуры во все более богатых по углероду областях аустенита.

Выводы

1. Разработан новый способ создания гетерофазной феррито-мартенситной структуры в низкоуглеродистых сталях – ступенчатая закалка, включающий низкотемпературную аустенитизацию вблизи A_{c3} , переохлаждение под A_{r1} с оптимальной выдержкой и последующую закалку в воду.

2. В результате ступенчатой закалки по режимам аустенитизация при $T_a = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ (30 мин.), переохлаждение на $T_{\text{п}} = 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 20 мин. для стали 20 и 5 мин. для стали 09Г2С формируется высокий комплекс механических свойств у стали 20 ($\sigma_{\text{в}} = 669\text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 430\text{ МПа}$, $\delta_{\text{общ.}} = 22\%$,

$\delta_p = 14 \%$) и у стали 09Г2С 20 ($\sigma_b = 760$ МПа $\sigma_{0,2} = 460$ МПа, $\delta_{\text{общ.}} = 21 \%$, $\delta_p = 12 \%$).

3. Показано, что высокая конструктивная прочность низкоуглеродистых сталей после ступенчатой закалки связана с формированием особого структурного состояния, когда зерна упрочняющей фазы в количестве 40–45 % находятся в «оболочке» мягких ферритных зерен. Электронно-микроскопически установлено, что зерна упрочняющей фазы состоят из широкого спектра продуктов низкотемпературного превращения аустенита от реек нижнего бейнита до пластин мартенсита, содержащего двойники.

Список использованных источников

1. Голованенко С.А., Фоништейн Н.М. Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1986. 206 с.
2. Пышминцев И.Ю. Упрочнение листовых сталей для холодного формоизменения. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2004. 160 с.
3. Металловедение. Сталь : справочник ; пер. с нем. В 2-х т. Т. 2 : Применение. В 2-х кн. / под ред. С.Б. Масленникова. М.: Металлургия, 1995. 447 с.
4. Морозов Ю.Д., Настич С.Ю., Матросов М.Ю. [и др.] Обеспечение повышенного комплекса свойств проката для труб большого диаметра на основе формирования феррито-бейнитной микроструктуры стали // Металлург. 2008. № 1. С. 41–46.
5. Фарбер В.М. Превращение переохлажденного аустенита // ФММ. 1993. Т. 76. № 2. С. 35–40.
6. Счастливец В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.П. Структура термически обработанной стали М.: Металлургия, 1994. 288 с.