

УДК. 669.14.018.29:621.015.004.12

В.И.Спиваков*, **Э.А.Орлов***, **И.В.Ганошенко****, **В.В.Володарский****,
Т.Ю. Иванова **

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
В ПРЕДЕЛАХ МАРКИ СТАЛИ И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА
МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ ДЛЯ ТРУБ
КЛАССА ПРОЧНОСТИ К56–К60**

**–Институт черной металлургии НАНУ, г.Днепропетровск*

***–ОАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь*

Исследовано влияние изменения химического состава в пределах марки стали 09–10Г2ФБ и скорости охлаждения на микроструктуру и свойства толстых листов. Показана возможность обеспечения свойств проката для труб классов прочности К56–К60 при выборе оптимальных параметров контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

Постановка задачи. Способ контролируемой прокатки (КП) с ускоренным охлаждением (КПУО) в настоящее время применяется в мировой практике при производстве толстолистового проката ответственного назначения (трубопроводный транспорт, судостроение) [1]. Эта технология является одним из видов деформационно–термического упрочнения (ДТУ), при которой ускоренное охлаждение (УО) проката производят после окончания деформации из области метастабильного аустенита со скоростями, превышающими в 5–10 раз охлаждение листов на воздухе при штатных режимах КП.

При КПУО в толстых листах из малоперлитной стали 10Г2ФБ требуемый комплекс свойств класса прочности К60 и выше обеспечивается при ориентировочном объемном соотношении в структуре рекристаллизованного полигонального феррита (95–85%) и продуктов неравновесного распада бейнитного типа (5–15%) без мартенситной структуры, ухудшающей пластические и вязкие свойства проката [2]. Для листов из стали 09Г2ФБ необходимый уровень прочности К56 достигается при штатных режимах КП и ориентировочном содержании феррита и перлита соответственно 90 и 10%.

При этом, соотношение фазово–структурных составляющих при КП и КПУО определяется не только температурно–деформационными параметрами прокатки, но и в значительной мере зависит от химического состава при его изменении в пределах марки стали.

Изложение основных материалов исследования. Исследовали влияние изменения химического состава в пределах марок стали 09–10Г2ФБ и скорости охлаждения ($V_{\text{охл}}$) при КП и КПУО на формирование

оптимальной микроструктуры и комплекса свойств листов для труб класса прочности К56–К60 (предел прочности ≥ 600 Н/мм²).

Анализ базы данных 130 промышленных плавок сталей 09–10Г2ФБ промышленного производства МК «Азовсталь» показал, что изменение химического состава указанных плавок адекватно отражается значениями критических точек (A_{c1} и A_{c3}), рассчитанных по методике [3].

Для учета влияния изменения химического состава из базы данных были выбраны три химических состава стали, при которых величина A_{c3} , как один из основных факторов, определяющих кинетику выделения феррита, охватывает весь фактический по выборке диапазон ее значений в пределах марок 09–10Г2ФБ, а именно минимальное – 847,0⁰С, максимальное – 883,5⁰С и среднее – 865,3⁰С.

Для этих химических составов стали определяли объемы выделившегося феррита (Φ ,%) в области диффузионного распада аустенита при температурах, полученных охлаждением с различными скоростями, по усовершенствованной в части анализа информации методике пересчета С–образных диаграмм изотермического распада в ТКД [4].

При последующем построении и анализе ТКД использовали среднюю скорость охлаждения ($V_{\text{охл}}$) в интервале температур от начала ($T_{\text{но}}$) до окончания ($T_{\text{ко}}$) ускоренного охлаждения. Значения $V_{\text{охл}}$ находятся в пределах 0,5 до 14⁰С/с при коэффициентах теплоотдачи ($\alpha=40\text{--}1500$ Вт/м²К), которые соответствуют условиям охлаждения листов толщиной 18,7мм на воздухе после КП и водой на установке УОВТ за чистовой клетью стана 3600.

Полученные данные использовали для создания многофакторной корреляционной модели диффузионного превращения переохлажденного аустенита в зависимости от изменения химического состава (A_{c3}) в допустимых для марок сталей 09–10Г2ФБ пределах и скоростях охлаждения листов при КП и КПУО.

Построение многофакторной корреляционной модели проводили методом пошагового выбора [5] независимых переменных ($V_{\text{охл}}$, τ , $\ln\tau$, T , A_{c3}). По уровню значимости (критерию Фишера) влияние скорости охлаждения оказалась ниже, чем совместное влияние $\ln\tau$ и T , поэтому в окончательный вариант модели скорость охлаждения, как независимая переменная, не была включена.

В результате получили зависимость объема феррита (Φ ,%) от химического состава стали (критической точки A_{c3}) и длительности охлаждения (τ , $\ln\tau$) аустенита в субкритическом интервале температур:

$$\Phi, \% = 10,92 + 0,316 * A_{c3} + 11,1 * \ln(\tau - \tau_{Ac3}) - 0,449 * T, \quad (r=0,95) \quad (1)$$

где T – текущая температура охлаждаемого листа, ⁰С; A_{c3} – критическая температура анализируемой плавки, ⁰С; $\ln(\tau - \tau_{Ac3})$ – натуральный логарифм длительности охлаждения раската в субкритическом интервале

температур; $\tau_{A_{c3}}$ – момент достижения температуры A_{c3} на кривой охлаждения, анализируемой точки поперечного сечения листа, сек.

Приведенная модель (1) с точностью 0,5% позволяет по температуре листа и длительности его охлаждения в субкритическом интервале температур определить количество образовавшегося феррита, а по соотношению $A\%=100-\Phi\%$ вычислить количество нераспавшегося аустенита.

Указанный объем аустенита (A%) претерпевает дальнейший распад, в зависимости от режима последующего охлаждения, с образованием перлита или неравновесных продуктов (псевдоэвтектоида, бейнитных структур), количество которых в конечной структуре совместно с объемом рекристаллизованного феррита и карбонитридной фазы определяет комплекс свойств стали.

Как видно из уравнения (1), количество нераспавшегося аустенита увеличивается пропорционально повышению температуры КПУО и обратно пропорционально длительности ускоренного охлаждения.

По приведенной многофакторной зависимости (1) можно производить выбор температурно–временных параметров КПУО и оценить характер структурообразования в стали типа 09–10Г2ФБ конкретного химического состава.

В качестве примера, на рисунке приведена область диффузионного превращения ТКД для стали 10Г2ФБ среднего (по выборке) химического состава ($A_{c3}=865,3^{\circ}\text{C}$), построенная по уравнению (1).

В приведенной ТКД изоаустенитные кривые области диффузионного превращения переохлажденного аустенита в логарифмической шкале времени аппроксимированы прямыми линиями.

Видно, что устойчивость аустенита, указанного химического состава, при охлаждении листов со скоростью $0,5-20^{\circ}\text{C}/\text{с}$ изменяется в пределах от 200 до 9 секунд, что соответствует режимам КП и КПУО. С учетом реальных температурно–временных параметров прокатки листов на стане 3600 ($T_{\text{кп}}=790-820^{\circ}\text{C}$, темп прокатки в чистовой клетки до 100с) это означает, что выделение равновесного избыточного феррита начинается уже во время деформации и продолжается при транспортировании листа к установке УОВТ (за 15–20с) до начала ускоренного охлаждения.

Повышение температуры конца прокатки при КПУО на 50°C приводит к увеличению количества нераспавшегося аустенита к началу УО, что потенциально способствует увеличению объема неравновесных структур.

В таблице приведен структурно–фазовый состав и прогнозируемый комплекс свойств листов толщиной 18,7мм из стали 10Г2ФБ среднего по выборке химического состава после различных режимов низкотемпературной КП и предлагаемой технологии (КПУО).

Видно, что в сравнении с низкотемпературной КП (режим 1) повышение температуры конца прокатки (режим 2) не приводит к изменению со-

отношения структурных составляющих, но снижает прочностные характеристики стали за счет увеличения размера зерна феррита (d).

$$A_{c3} = 865,3 \text{ (ср. x/c)}$$

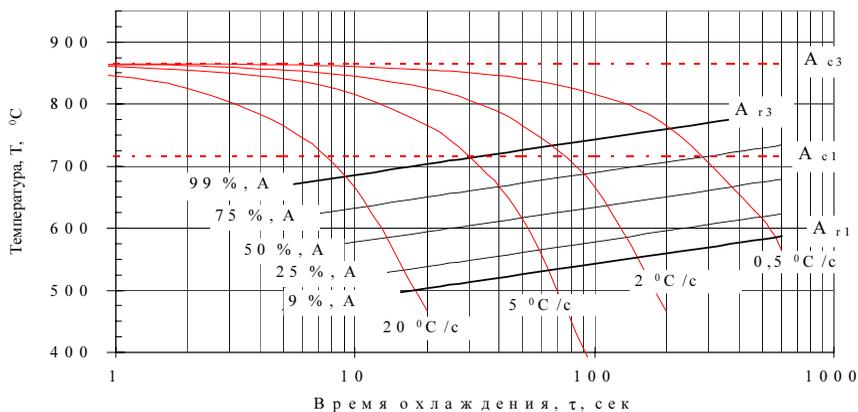


Рис.1 ТКД в области диффузионного превращения стали 10Г2ФБ среднего (по выборке) химического состава ($A_{c3}=865,3^{\circ}\text{C}$): цифры у линий указывают скорости охлаждения ($^{\circ}\text{C/c}$) и промежуточное количество неперлитной аустенитной составляющей (%); интервал $V_{\text{охл}}$ листов толщиной 18,7 мм при КПУО – $5-20^{\circ}\text{C/c}$.

Применение УО (после КП с повышенной на 50°C температурой конца прокатки – режим 3) приводит к некоторому увеличению количества перлитной составляющей (очевидно за счет образования псевдоэвтектоидных колоний перлита) и увеличению дисперсности зерен феррита (с $5,83$ до $5,00\text{мкм}$), что обеспечивает повышение прочностных характеристик и сохранению пластичности на уровне не ниже, чем при низкотемпературной КП (δ_5 равно $23,7$ и $22,7\%$ соответственно).

Увеличение скорости охлаждения на УОВТ с $6,6$ до $11,0^{\circ}\text{C/c}$ (режимы 3 и 4) приводит к дальнейшему повышению прочностных свойств (с $644,0$ до $657,9 \text{ Н/мм}^2$) за счет появления продуктов бейнитного распада ($3-5\%$) вместо псевдоэвтектоидных колоний перлита.

Более значительное повышение $T_{\text{кп}}$, например, на $80-100^{\circ}\text{C}$, и одновременное увеличение скорости охлаждения (режим 5) снижает дисперсность ($6,9\text{мкм}$) феррита и приводит к резкому возрастанию количества (до $33,8\%$) бейнитных продуктов распада переохлажденного аустенита, что дает значительное увеличение прочности σ_B (на 100Н/мм^2), но недопустимо снижает пластичность ($\delta_5=19,4\%$) стали.

Таблица. Изменение параметров микроструктуры и механических свойств листов толщиной 18,7мм для труб класса К56 – К60 из стали 09–10Г2ФБ среднего по выборке химического состава в зависимости от режимов КП и КПУО

№ п/п	Режимы КП и КПУО		V _{воздух} °C/с	V _{УОВТ} °C/с	Параметры микроструктуры			Механические свойства			
	Температуры, °C				Ф, %	П, %	Б, %	d, мкм	σ _в , Н/мм ²	σ _т , Н/мм ²	δ ₅ , %
	Т _{нп}	Т _{кп}									
Контролируемая прокатка (КП)											
1	880	690	0,56	–	89,7	10,3	0,0	5,48	668,1	566,6	22,7
2	930	740	0,60	–	89,7	10,3	0,0	5,83	623,7	509,4	24,8
Контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением (КПУО)											
3	930	740	0,60	6,60	89,6	10,4	0,0	5,00	644,0	542,0	23,7
4	930	740	0,60	11,00	89,6	7,3	3,1	4,00	657,9	572,8	23,2
5	930	820	0,70	13,90	63,1	3,1	33,8	6,90	758,6	590,2	19,4

Примечание: указаны скорости охлаждения листа:

V_{уовт} – в установке УОВТ для режимов КПУО;

V_{воздух} – при охлаждении на транспортном рольганге после УОВТ.

Заключение. Таким образом, режим 5 ($T_{\text{кп}}=820^{\circ}\text{C}$), при котором образуется около 34% бейнита, неприемлем для реализации из-за резкого ухудшения пластических ($\delta_5 < 22\%$) и вязких свойств.

Результаты исследования позволяют выбирать оптимальные параметры КП и КПУО, обеспечивающие необходимый комплекс механических свойств в листах для производства сварных труб К56–К60 с учетом химического состава плавки.

1. *Морозов Ю.Д.* Тенденции развития сталей для газопроводных труб большого диаметра. // В сб. докладов междунаучно-технической конференции «Азовсталь-2002». – М., Металлургиздат, 2004, – С.28
2. *Эфрон Л.И.* / Термомеханическая прокатка как способ получения высокоэффективных высокопрочных сталей для труб большого диаметра северного назначения. // В сб. докладов междунаучно-технической конференции «Азовсталь-2002». – М., Металлургиздат, 2004, – С.53
3. *Структура* конструкционной легированной стали. / Б.Б.Винокур, В.К.Пилюшенко и др. – М., Металлургия, 1983. – С.216 с.
4. *Пилюшенко В.Л., Ноговицын А.В.* Феноменологическая модель механических свойств проката из низкоуглеродистой микролегированной стали. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов. – Киев: Наукова думка, 1995. – С.206–219
5. *Шураков В.В., Дайитбегов Д.М.* Автоматизированное рабочее место для статистической обработки данных, – М.: Финансы и статистика, 1990. – 190 с.ил.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. И.Г.Узловым.