

В.И.Спиваков*, Э.А.Орлов*, И.В. Ганошенко**,
П.Л. Литвиненко*, В.В.Володарский**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЛИСТОВ ИЗ МАЛОПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ ПО РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМАМ

* *Институт черной металлургии НАНУ,*

** *ОАО «МК «Азовсталь»*

Разработан метод оценки структурного состояния листов из малоперлитных сталей типа 10Г2ФБ (Х65–Х70) после низкотемпературной контролируемой прокатки и при повышенной температуре с последующим ускоренным охлаждением. Показано, что распад аустенита начинается при деформации в последних проходах с выделением избыточного феррита, а завершается при изотермической выдержке после ускоренного охлаждения.

Постановка задачи. Прогнозирование структурного состояния и механических свойств проката при низкотемпературной контролируемой прокатке (НКП) и при повышенных температурах КП с ускоренным охлаждением (КПУО) возможно на основе исследования кинетики распада аустенита в условиях нестационарного температурного поля. Применение традиционного метода с использованием ТКД и кривых охлаждения, полученных при натурных замерах температур или расчетным путем при усредненных коэффициентах (α , λ , c), эффективно при качественном структурном анализе.

Целью настоящей работы было получение количественных данных о соотношении структурных составляющих в листовом прокате из малоперлитных сталей на основе применения зависимостей изменения ТКД от химического состава и уточненной методики расчета температурного поля раскатов, включая стадии прокатки.

Методика исследования. Влияние изменения химического состава в пределах марки малоперлитных сталей типа 09–10Г2ФБ на микроструктуру толстых листов при НКП и КПУО показано в работе [1]. Для определения температурного поля раскатов использовали разработанную в ИЧМ НАНУ базовую программу расчета температурного поля листов в процессе охлаждения [2], в которой учтены зависимости:

- теплофизических характеристик металла (α , λ , c) от температуры;
- коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{\text{в}}$) от металла к валкам ;
- коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{\text{к}}$) на воздухе;
- коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{\text{во}}$) в установке УОВТ при охлаждении водой.

Алгоритм расчета температурного поля раскатов по указанной программе не учитывает фактор дискретного изменения толщины металла при прокатке. Учитывая, что при НКП и КПУО процессы распада аустенита могут начинаться уже в процессе деформации, алгоритм расчета температурного поля раскатов должен учитывать их толщину, которая изменяется на порядок после обжатий в черновой и чистой клетях стана при соответствующих изменениях граничных условий теплоотвода.

При расчете температурного поля раската для учета изменения его толщины в процессе прокатки исходили из теории подобия (обобщенных переменных) [3], в соответствии с которой относительная температура (θ) пластины (раската) есть функция трех безразмерных критериев подобия: Био ($Bi = \alpha R / \lambda$); Фурье ($Fo = a\tau / R^2$) и параметрического критерия X/R , т.е.:

$$\theta = T(\tau, X) - T_c / (T_0 - T_c) = f(Bi, Fo, X/R), \quad (1)$$

где $T(\tau, X)$ – текущая температура;

T_0, T_c – температура исходная и охлаждающей среды соответственно;

τ – длительность охлаждения;

X/R – относительная координата поперечного сечения раската;

R – полутолщина раската.

Изложение основных материалов исследования. В соответствие с теорией подобия, фиксированным значениям критериев $Bi, Fo, X/R$ отвечает множество различных сочетаний параметров процесса охлаждения, что позволяет при расчете изменения температурного поля раската заметить их действительные значения на условные [3].

Для дальнейших выкладок введем индексацию параметров охлаждения: 1, 2, ... i – действительные значения параметра на i -том участке охлаждения, $1_y, 2_y, \dots, i_y$ – условные (принимаемые в расчете при замене) значения параметра на i -том участке.

Если толщина раската в процессе деформации уменьшается с R_1 до R_2 , то для подобия действительного и расчетного температурных полей после обжатия необходимо соблюдать равенство критериев подобия:

$$\begin{aligned} Bi_2 &= \alpha_2 R_2 / \lambda_2 = Bi_{2y} = \alpha_{2y} R_{2y} / \lambda_{2y}; \\ Fo_2 &= a_2 \tau_2 / R_2^2 = Fo_{2y} = a_{2y} \tau_{2y} / R_{2y}^2; \\ X_2 / R_2 &= X_{2y} / R_{2y}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения параметров охлаждения раската, вводимых в программу расчета [2] (при $2R = \text{const}$) после первого обжатия, получаем:

1) $R_{2y} = R_{1y} = R_1$ и при независимости коэффициента теплопроводности (λ) от толщины раската ($\lambda_2 = \lambda_{2y}$) имеем:

$$\alpha_2 R_2 / \lambda_2 = \alpha_{2y} R_{2y} / \lambda_{2y} = \alpha_{2y} R_1 / \lambda_{2y},$$

откуда

$$\alpha_{2y} = (\alpha_2 R_2 / \lambda_2) / (R_1 / \lambda_{2y}) = \alpha_2 (R_2 / R_1).$$

Так как $R_1 > R_2$, то $\alpha_{2y} < \alpha_2$, то коэффициент теплоотдачи, принимаемый в расчете α_{2y} должен быть уменьшен относительно действительного

α_2 пропорционально (R_2/R_1) и для последующих обжатий (участков охлаждения) будем иметь:

$$\alpha_{iy} = \alpha_i (R_i/R_1); \quad (3)$$

2) аналогично (3), при равенстве $F_{O_2} = a_2\tau_2/R_2^2 = F_{O_{2y}} = a_{2y}\tau_{2y}/R_{2y}^2$, пропорционально увеличиваем действительные временные интервалы:

$$\tau_{2y} = (a_2\tau_2/R_2^2)/(a_{2y}/R_{2y}^2) = \tau_2 (R_1^2/R_{2y}^2).$$

При неизменности коэффициента температуропроводности ($a_2 = a_{2y}$) расчетное время будет больше действительного, т.к. $R_1^2/R_{2y}^2 > 1$, или для расчета последующих обжатий (участков охлаждения) имеем:

$$\tau_{iy} = \tau_i (R_1^2/R_i^2); \quad (4)$$

3) соотношение относительных координат (X/R) точек внутри поперечного сечения раската:

$$X_{pi} = X_i(R_i/R_1). \quad (5)$$

Таким образом, для расчета температурных полей раската в реальном временном масштабе при дискретном уменьшении толщины при обжатиях, необходимо на каждом временном участке охлаждения, уменьшить α_p , в соответствии с приведенными выше соотношением (3), т.е. в R_i/R_1 раз, а величину временных интервалов увеличивать пропорционально (4) при наблюдении соотношения (5).

На данном этапе, в расчетах не учитывали выделения тепла за счет пластической деформации и фазового превращения [4].

По разработанной методике был проведен расчет изменения температурного поля при НКП и КПУО раскатов толщиной 65 мм на лист размерами 18,7x2150x11900 мм стали 10Г2ФБ (X70) в условиях стана 3600 ОАО «МК «Азовсталь».

Процесс охлаждения раската после черновой прокатки рассматривали состоящим из нескольких временных интервалов, отличающихся различными условиями теплоотвода, из которых основное влияние на структурообразование оказывают следующие:

1) первый – охлаждение после черновой прокатки подката толщиной 65 мм на воздухе до заданной температуры начала прокатки в чистовой клети ($T_{нп}$). Временной интервал здесь составляет от 200–250сек при изменении α от 130 до 100 Вт/м²К в зависимости от температуры поверхности металла;

2) второй – охлаждение раскатов при прокатке в чистовой клети, где периоды теплоотвода в очаге деформации чередуются с охлаждением на воздухе при прокатке остальной части раската. Длительность обжатия в очаге деформации изменяется незначительно ($\approx 0,012-0,020$ сек) при $\alpha_v = 5000$ Вт/м²К, а время охлаждения раската на воздухе ($\alpha = 120 \div 70$ Вт/м²К) увеличивается (от 6,5 до 14,2 сек) с учетом реверса и увеличения длины раската. Общее время прокатки в чистовой клети составляет 80–90 сек;

3) третий – охлаждение раската на воздухе после чистовой клети на отводящем рольганге до температуры среды при перемещении раската по

технологическому потоку стана ($\alpha \approx 90\text{--}60 \text{ Вт/м}^2\text{К}$) или в установке УОВТ ($\alpha \approx 1000\text{--}800 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ в течении 12,0–20,0 сек.

В разные моменты времени при НКП или КПУО на 2–м участке температура металла достигает значений межкритического интервала (A_{c3} – A_{c1}), где начинается процесс распада аустенита с выделением полигонального феррита, а на 3–м – завершается $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение. От изменения деформационных и температурно–временных параметров на этих участках зависит фазовый состав и морфология окончательной микроструктуры металла по всему сечению проката.

В табл.1 приведены деформационно–временные параметры процесса НКП листов толщиной 18,7 мм из стали типа 10Г2ФБ(Х70), включающие изменения толщины раската (2R), величину обжатия в каждом проходе, действительные и расчетные периоды охлаждения ($\tau_{\text{ох}}$) и соответствующие им коэффициенты теплоотдачи (α и α_y).

На рис.1 показана динамика изменения толщины и температуры раската в процессе НКП и КПУО, полученные расчетным путем по приведенной методике.

Полученные температурно–деформационные параметры раскатов при НКП и КПУО позволяют перейти к анализу структурообразования в листовом прокате заданной толщины и марки стали. Оценку ожидаемого структурного состояния производили методом совместного анализа многофакторной корреляционной модели ТКД малоperlитной стали [1] и полученных температурных кривых охлаждения раскатов (рис.1), рассчитанных для режимов технологии НКП и КПУО.

С учетом данных о влиянии деформации [5], которая повышает температуры начала Ф – П и бейнитного распада, модель [1] выглядит следующим образом:

$$\Phi, \% = 10,92 + 0,316A_{c3} + 11,1 \ln(\tau - \tau_{Ac3}) - 0,449T + 3,2\varepsilon, \quad (6)$$

где: T – текущая температура охлаждаемого раската, $^{\circ}\text{C}$;

A_{c3} – критическая температура, $^{\circ}\text{C}$;

$\ln(\tau - \tau_{Ac3})$ – натуральный логарифм длительности охлаждения раската в субкритическом интервале температур;

τ_{Ac3} – момент достижения температуры A_{c3} на кривой охлаждения, анализируемой точки поперечного сечения листа, сек;

ε – процент деформации в последних проходах, %.

Приведенная модель связывает зависимость образовавшегося количества избыточного феррита (% Ф) от химического состава (A_{c3}) и длительности охлаждения аустенита в диффузионной области с учетом влияния величины деформации в последних проходах.

Таблица 1. Деформационно–временные параметры в чистовой клети при НКП листов толщиной 18,7 мм из стали 10Г2ФБ (Х70)

№№ про–	Деформа– ционные	Время охлаждения, сек	Коэффициент теплоотдачи,
---------	---------------------	-----------------------	-----------------------------

ходо- дов	параметры		действительное		расчетное		Вт/м ² К	
	h, мм	Δh, мм	$\tau_r^{2)}$	$\tau_{ox}^{3)}$	$\tau_r^{2)}$	$\tau_{ox}^{3)}$	α	α_p
	65,0 ¹⁾			200		200	124,4	124,4
1	58,0	7,0	6,49	271,42	8,16	8,2	109,5	97,7
2	51,5	6,5	5,00	272,92	7,96	10,5	109,3	86,6
3	45,5	6,0	7,90	280,82	16,12	26,7	107,7	75,4
4	40,0	5,5	5,00	282,32	13,20	30,6	103,7	63,8
5	35,5	4,5	9,66	291,98	32,37	63,0	99,8	54,5
6	31,5	4,0	5,00	293,48	21,29	69,4	94,5	45,8
7	28,0	3,5	11,80	305,28	63,61	133,0	89,4	38,5
8	25,0	3,0	5,00	306,78	33,80	143,1	84,1	32,3
9	22,5	2,5	14,18	320,96	118,35	261,5	79,0	27,4
10	20,5	2,0	5,00	322,46	50,27	276,6	74,7	23,5
11	18,7	1,8	24,96	347,42	301,55	578,1	69,7	20,1

Примечания:

- 1) охлаждение подката толщиной 65 мм в течении 200 сек;
- 2) τ_r – период охлаждения головы раската между обжатиями;
- 3) τ_{ox} – суммарное время охлаждения от начала выдержки между черновой и чистовой клетями.

Рассмотрим процесс структурообразования в прокате, толщиной 18,7 мм для химического состава, соответствующего стали 10Г2ФБ (Х70) (%), %С=0,12; Мn=1,70; Nb=0,022 и V=0,068; $A_{c3}=865,3^{\circ}\text{C}$) с учетом влияния суммарной деформации в двух последних проходах (17,7 %) при НКП и КПУО.

По указанной модели (6) определили количество образовавшегося феррита после последних проходов (№10, 11) в чистовой клетке, а по соотношению: $A_{огт}=100-\%Ф$, рассчитали количество нераспавшегося аустенита, способного при ускоренном охлаждении в установке УОВТ претерпеть распад на структуры неравновесного типа.

Результаты оценки динамики структурообразования в процессе НКП и КПУО по модели (6) с учетом влияния деформации в последних проходах и увеличения температуры начала прокатки на 50°C при КПУО (с 880 до 930°C) приведены в табл.2.

Расчеты показывают (см. табл.2), что в процессе НКП уже после прохода №9 начинается выделение феррита и в последних двух проходах (№№10 и 11) его количество достигает 66% и 30% соответственно в поверхностных и центральных зонах раската. В указанных проходах происходит частичная рекристаллизация аустенита и выделившегося феррита.

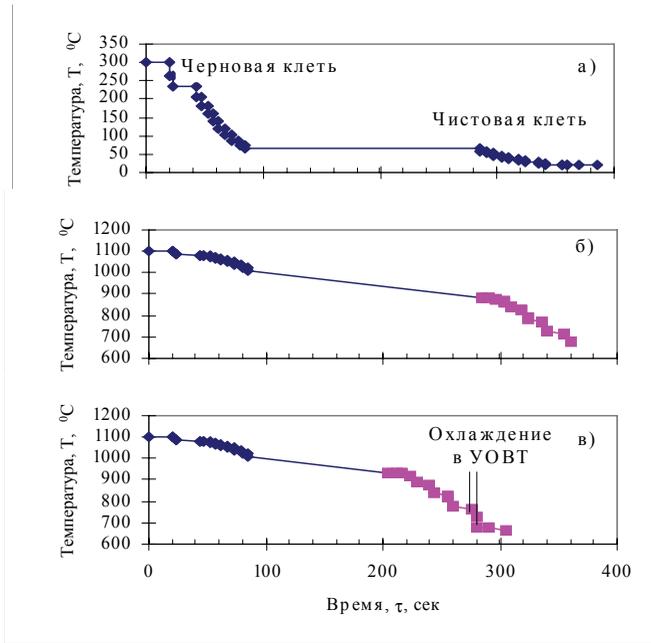


Рис.1. Изменение толщины раската (а) и среднemasовой температуры при штатной НКП (б) и КПУО (в) в условиях стана 3600 листов толщиной 18,7мм из стали 10Г2ФБ (Х70).

При дальнейшем охлаждении раската на воздухе после прокатки при температурах 600–610⁰С происходит образование до 8% перлита из оставшегося деформированного аустенита при отсутствии бейнитной структуры. При КПУО (с повышением температуры прокатки на 50⁰С) после последнего прохода №11 перед УОВТ в поверхностных и центральных зонах листа выделяется до 40% и 6% феррита соответственно (табл.2).

Таким образом, при КПУО с учетом влияния деформации, ускоренному охлаждению с последующим образованием феррита, перлита и неравновесных структур в поверхностных слоях может подвергаться до 60%, а в центральных до 90% переохлажденного аустенита в зависимости от химического состава (A_{c3}) стали и температуры начала охлаждения на УОВТ. В процессе ускоренного охлаждения металла на установке УОВТ (до 690–650⁰С) по сечению раскатов происходит дальнейшее выделение ферритной (до 70–90%) и перлитной (до 3–6%) составляющих. После завершения УО распад оставшегося аустенита (см. табл.2) происходит в условиях выравнивания температуры по сечению листа т.е. практически при изотермической выдержке (40–50сек) при температуре около 600⁰С в бейнитной области. При этом количество перлитной и бейнитной составляющих в структуре может достигать соответственно 8–10 и 5–10% (ос-

тальное феррит), что приемлемо для обеспечения пластических и вязких свойств малоперлитной стали типа 10Г2ФБ(Х70) при КПУО без дополнительного отпуска.

Таблица 2. Динамика распада аустенита стали 10Г2ФБ ($A_{с3}=865,3^{\circ}\text{C}$) при НКП и КПУО листов толщиной 18,7мм в зависимости от температуры с учетом влияния деформации

		№ 10		№ 11		До УОВТ		УОВТ			После УОВТ			
		$^{\circ}\text{C}$	Ф	$^{\circ}\text{C}$	Ф	$^{\circ}\text{C}$	Ф	$^{\circ}\text{C}$	Ф	П	$^{\circ}\text{C}$	Ф	П	Б
НКП	П	685	56	663	66	695	66	650	75	–	600	92	7,9	–
	Ц	741	24	732	29	706	47	660	67	–	607	92	7,9	–
КПУО	П	735	30	713	40	725	40	650	88	5,6	600	88	7,5	4,5
	Ц	815	–	795	–	776	6	690	69	2,8	635	82	7,4	10

Примечание:

- 1) №10, №11 – номера обжатий (проходов) в чистовой клетке;
- 2) П, Ц – соответственно поверхностная и центральная зона раската.
- 3) Ф, П, Б – количество (%) структурных составляющих.

Результаты анализа указанных численных экспериментов (табл.2) по оценке формирования микроструктуры листов из малоперлитной стали данного химического состава показали их соответствие фактическому структурному состоянию и механическим свойствам проката после НКП и КПУО.

Выводы. Таким образом, разработанная методика позволяет, в частности, не прибегая к проведению дорогостоящих промышленных экспериментов, предварительно разрабатывать различные технологические режимы и температурно–деформационные параметры контролируемой прокатки листов с ускоренным охлаждением, в том числе с учетом конкретного химического состава плавок малоперлитной стали.

1. *Исследование* влияния изменения химического состава в пределах марки стали и скорости охлаждения на микроструктуру и свойства толстых листов для труб класса прочности К56–К60. / В.И. Спиваков, Э.А. Орлов, И.В. Ганошенко и др. // В сб. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ.– Выпуск 12.– 2006.–С.15.
2. *Разработать* модель температурного поля и структурных превращений при циклически асимметричном охлаждении листового проката (КС.074.97) Отчет о НИР (Заключительный) // ИЧМ НАНУ; руководитель В.И. Спиваков. Днепропетровск, 1997. – С.72.
3. *Львов А.В.* Теория теплопроводности, М.: Высшая школа, 1967, 600 с. с ил.
4. *Погоржельский В.И.* Контролируемая прокатка непрерывнолитого металла. – М.:Металлургия, 1986.– 150с. с ил.
5. *Структура* и свойства сталей. Справочник под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1989.– С.153.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. И.Г.Узловым