

Уменьшения эффекта скручивания металла в процессе прошивки возможно добиться за счет уменьшения длины очага деформации, в первую очередь благодаря применению рабочего инструмента соответствующей калибровки (увеличение угла выходного конуса валков, применение оправок меньшей длины и т.д.), а также соответствующей настройкой очага деформации (прошивка на повышенных углах подачи валков  $12^\circ$  и более, уменьшение обжатия перед носком оправки до 5 – 6 %, повышение коэффициента овализации очага деформации). Реализация указанных мероприятий при прошивке заготовок с «подъемом» гильз по диаметру в станах с бочковидными валками приведет к уменьшению разницы угловых скоростей для точек захвата заготовки валками и выхода гильзы из валков прошивного стана и, как следствие, к снижению результирующего скручивания металла наружных слоев гильзы.

УДК 621.74: 669.14

Э.Б. Тен<sup>1</sup>, Е.Ю. Лихолобов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

<sup>2</sup> АО «Алюминий Казахстана»

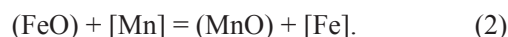
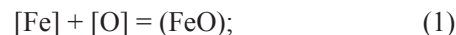
## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПЛАВКИ СТАЛИ 110Г13Л ИЗМЕРЕНИЕМ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВЕ

Сталь 110Г13Л выплавляют преимущественно в дуговых печах с основной футеровкой методами окисления, переплава или сплавления. Во всех вариантах плавки, при всех прочих равных условиях, качество стали и отливок определяется тем, как проведены заключительные операции восстановительного периода. Желательно их завершить при высокой основности шлака и при низком содержании в нем FeO и MnO. Согласно работе [1], наилучшие качественные показатели стали достигаются при основности шлака  $(CaO)/(SiO_2) \geq 2,5$  и при  $\Sigma(FeO + MnO) \leq (3,0 - 4,5) \%$ . По другим данным [2] предельно допустимое содержание  $\Sigma(FeO + MnO)$  составляет 4,5 % при выплавке стали методом окисления и 6 % при выплавке стали методами переплава или сплавления.

Высокую основность обеспечивают регулированием состава и количества шлакообразующих присадок, а низкое содержание  $\Sigma(FeO + MnO)$  – путем обработки шлака раскислительной смесью, состоящей из известняка, ферросилиция и кокса. Контроль за достижением этих условий осуществляют путем периодического отбора и химического анализа проб шлака. Очевидно, что такой метод контроля раскисленности шлака затратен и не оперативен.

В данной работе рассмотрена возможность экспрессной оценки  $\Sigma(FeO + MnO)$  путем измерения активнос-

ти кислорода в жидкой стали. Такая возможность вытекает из рассмотрения следующих двух реакций:



Константа равновесия реакции (1) равна

$$K_{FeO} = a_{FeO} / (a_{[Fe]} a_{[O]}) = a_{FeO} / a_{[O]} = (\% FeO) \gamma_{FeO} / a_{[O]}, \quad (3)$$

где  $a_{FeO}$ ,  $\gamma_{FeO}$ ,  $(\% FeO)$  – соответственно активность, коэффициент активности и содержание оксида железа (II) в шлаке;  $a_{[Fe]}$  и  $a_{[O]}$  – активности железа и кислорода в жидкой стали ( $a_{[Fe]} = 1$ ).

Из равенства (3) имеем

$$(\% FeO) = K_{FeO} a_{[O]} / \gamma_{FeO}. \quad (4)$$

Константа равновесия реакции (2) определяется выражением

$$K_{MnO} = a_{MnO} / (a_{FeO} a_{[Mn]}) = (\% MnO) \gamma_{MnO} / \{(\% FeO) \gamma_{FeO} [f_{[Mn]}]\}, \quad (5)$$

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алещенко А.С., Лубе И.И., Богатырев Д.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 7. С. 20 – 23.
2. Фомичев И.А. Косая прокатка. – Харьков: Металлургиздат, 1963. – 262 с.
3. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
4. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.

© 2012 г. Б.А. Романцев, И.И. Лубе  
Поступила 19 сентября 2011 г.

где  $a_{\text{MnO}}$ ,  $\gamma_{\text{MnO}}$ , (% MnO) – соответственно активность, коэффициент активности и содержание оксида марганца (II) в шлаке;  $[\% \text{ Mn}]$ ,  $f_{[\text{Mn}]}$  – соответственно содержание марганца в жидкой стали и его коэффициент активности.

Из выражения (5) следует:

$$(\% \text{ MnO}) = (\% \text{ FeO})K_{\text{MnO}}[\% \text{ Mn}]f_{[\text{Mn}]} \gamma_{\text{FeO}} / \gamma_{\text{MnO}}. \quad (6)$$

На основе (6) имеем

$$(\% \text{ MnO}) + (\% \text{ FeO}) = (\% \text{ FeO}) \{ K_{\text{MnO}}[\% \text{ Mn}]f_{[\text{Mn}]} \gamma_{\text{FeO}} / \gamma_{\text{MnO}} + 1 \}. \quad (7)$$

Подставляя в правую часть равенства (% FeO) из (4), получаем

$$(\% \text{ MnO}) + (\% \text{ FeO}) = (K_{\text{FeO}} a_{[\text{O}]} / \gamma_{\text{FeO}}) \times \{ K_{\text{MnO}}[\% \text{ Mn}]f_{[\text{Mn}]} \gamma_{\text{FeO}} / \gamma_{\text{MnO}} + 1 \}. \quad (8)$$

После ряда преобразований из (8) получаем

$$(\% \text{ MnO}) + (\% \text{ FeO}) = a_{[\text{O}]} \{ A + B[\% \text{ Mn}] \}, \quad (9)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  равны

$$A = K_{\text{FeO}} / \gamma_{\text{FeO}}; \quad (10)$$

$$B = (K_{\text{MnO}} K_{\text{FeO}} f_{[\text{Mn}]} / \gamma_{\text{MnO}}). \quad (11)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  содержат в качестве параметров константы равновесия реакций (1) и (4), которые зависят только от температуры, а также коэффициенты активности  $\gamma_{\text{FeO}}$ ,  $\gamma_{\text{MnO}}$ ,  $f_{[\text{Mn}]}$ .

Значения констант равновесия рассчитывали по уравнениям их температурной зависимости [3]:

$$\lg K_{\text{FeO}} = 6320 / T - 0,734; \quad (12)$$

$$\lg K_{\text{MnO}} = 6440 / T - 2,95. \quad (13)$$

Для условий плавки стали (температуре жидкой стали в печи около 1550 °C) получили

$$\lg K_{\text{FeO}} = 2,733 \text{ и } K_{\text{FeO}} = 540,8; \quad (14)$$

$$\lg K_{\text{MnO}} = 0,58 \text{ и } K_{\text{MnO}} = 3,802. \quad (15)$$

Коэффициенты активности  $\gamma_{\text{FeO}}$  и  $\gamma_{\text{MnO}}$  находили из следующих предпосылок [2]:

- при основности шлака  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 2,0$  отношение  $\gamma_{\text{FeO}}/\gamma_{\text{MnO}} = 1,5$ , при этом  $\gamma_{\text{FeO}} = 3$ ,  $\gamma_{\text{MnO}} = 2$ ;
- при основности шлака  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) \geq 3,0$  отношение  $\gamma_{\text{FeO}}/\gamma_{\text{MnO}} \approx 1$ ;
- с повышением основности шлака  $\gamma_{\text{FeO}}$  возрастает, но  $\gamma_{\text{MnO}}$  увеличивается быстрее.

Из первых двух позиций приняли, что при плавке стали 110Г13Л основность шлака  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$  близка к среднему для двух вариантов значению  $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) \approx 2,5$ , поэтому усреднили и отношение  $\gamma_{\text{FeO}}/\gamma_{\text{MnO}} = (1,5 + 1) / 2 = 1,25$ . А из последней позиции приняли, что  $\gamma_{\text{FeO}} = 3$ ,  $\gamma_{\text{MnO}} = 3 / 1,25 = 2,4$ .

Коэффициент активности марганца  $f_{[\text{Mn}]}$  находили по известным параметрам взаимодействия первого порядка [4] с учетом того, что  $e_{[\text{Mn}]}^{\text{Si}} = 0$  и  $e_{[\text{Mn}]}^{\text{Mn}} = 0$ :

$$\lg f_{[\text{Mn}]} = \Sigma(e_{[\text{Mn}]}^j [\% j]) = e_{[\text{Mn}]}^{\text{C}} [\% \text{ C}] + e_{[\text{Mn}]}^{\text{P}} [\% \text{ P}] + e_{[\text{Mn}]}^{\text{S}} [\% \text{ S}].$$

В результате для стали 110Г13Л при содержании в ней 1,18 % С, 0,05 % Р и 0,02 % S получили  $\lg f_{[\text{Mn}]} = -0,083735 \approx -0,084$  и  $f_{[\text{Mn}]} = 0,8246 \approx 0,825$ .

Используя полученные значения параметров, определили значения коэффициентов  $A$  и  $B$ :

$$A = K_{\text{FeO}} / \gamma_{\text{FeO}} = 540,8 / 3 = 180,3,$$

$$B = [(K_{\text{MnO}} / \gamma_{\text{MnO}}) K_{\text{FeO}} f_{[\text{Mn}]}] = (3,802 / 2,4) \cdot 540,8 \cdot 0,825 = 706,79 \approx 706,8.$$

Таким образом, вместо (9), получили

$$(\% \text{ MnO}) + (\% \text{ FeO}) = a_{[\text{O}]} (180,3 + 706,8 [\% \text{ Mn}]). \quad (16)$$

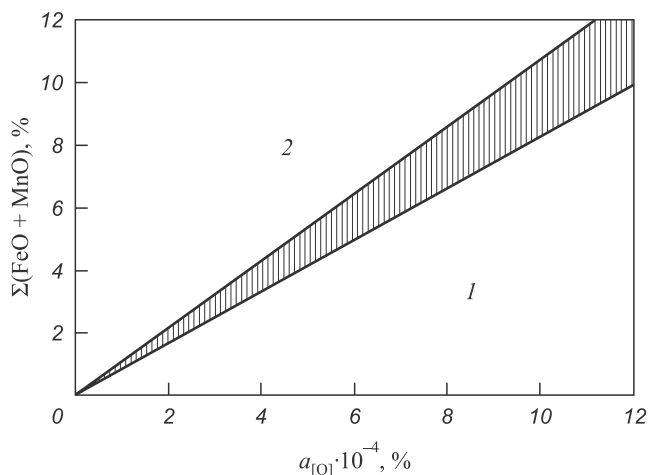
По формуле (16) оценили ожидаемые значения  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  при различной активности кислорода в жидкой стали. Полученные результаты представлены в табл. 1 и на рисунке.

Из табл. 1 следует, что при активности кислорода в жидкой стали  $a_{[\text{O}]} = 0,0003$  % суммарное содержание оксидов железа и марганца  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  составляет 2,5 – 3,2 % при изменении содержания марганца в пределах 11,5 – 15,0 %. При активности кислорода  $a_{[\text{O}]} = 0,0005$  %  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  возрастает с 4,2 до 5,4 % при увеличении содержания марганца в стали с 11,5 до 15 %. При более высокой активности кислорода  $a_{[\text{O}]} = 0,0007 - 0,0009$  % в тех же условиях

Таблица 1

**Влияние марганца на изменение  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  при различной активности кислорода в жидкой стали 110Г13Л**

Активность кислорода $a_{[\text{O}]}$ , %	Расчетные значения $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ , %, при содержании марганца $[\text{Mn}]$ , %				
	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0
0,0003	2,49	2,60	2,81	3,02	3,23
0,0005	4,15	4,33	4,68	5,04	5,39
0,0007	5,82	6,06	6,56	7,05	7,55
0,0009	7,48	7,79	8,43	9,07	9,70



Влияние активности кислорода в стали на  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  в шлаке при различном содержании в ней марганца:

1, 2 – содержание марганца в стали 11,5 и 15,0 % соответственно

$\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  возрастает соответственно до 5,8 – 7,6 и 7,5 – 9,7 %.

Из рисунка следует, что основное влияние на величину  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  оказывает активность кислорода  $a_{[\text{O}]}$ : влияние марганца возрастает по мере увеличения активности кислорода, но во всем диапазоне изменения содержания марганца в стали (от 11,5 до 15,0 %) роль активности кислорода является преобладающей. Поэтому определение  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  по измеренным значениям активности кислорода  $a_{[\text{O}]}$  с использованием соотношения (16) обеспечивает высокую надежность получаемых результатов.

При этом при выплавке стали методом окисления условие [2]  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 4,5$  % достигается при активности кислорода  $a_{[\text{O}]} \leq (4,1 - 5,5) \cdot 10^{-4}$  %, где нижнее и верхнее значения получаются при содер-

жании марганца в стали соответственно на верхнем (15,0 %) и нижнем (11,5 %) пределах. При выплавке стали методом переплава и сплавления условие [2]  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 6$  % в тех же условиях достигается при  $a_{[\text{O}]} \leq (5,5 - 7,2) \cdot 10^{-4}$  %.

Для повышения точности прогноза следует учесть фактическое содержание марганца в стали. Но этот фактор не лимитирует процесс, поскольку содержание марганца в жидкой стали в конце плавки всегда известно в виду периодического его контроля. Поэтому, чтобы оперативно определить  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ , будет достаточно измерить активность кислорода. Такая возможность имеется, если использовать устройство УКОС [5] с датчиком электрохимического элемента из твердого электролита  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированного  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и электродом сравнения  $\text{Mo} - \text{MoO}_2$ . При погружении датчика в жидкую сталь в нем вырабатывается ЭДС ( $E$ , мВ), величина которой когерентна активности кислорода в расплаве:

$$\lg a_{[\text{O}]} = 2,685 - (10,087E + 5660)/T, \quad (17)$$

где  $T$  – температура жидкой стали, К.

Изложенную концепцию опробовали в условиях литейно-механического цеха АО «Алюминий Казахстана», где плавку стали 110Г13Л осуществляют в 6-т дуговых печах с основной футеровкой. Для оптимизации технологии доводки плавки в печи и ковшовой обработки стали на предприятии внедрили в эксплуатацию систему экспрессного контроля активности кислорода в жидкой стали. Вычисленное по соотношению (17) значение активности кислорода  $a_{[\text{O}]}$  (%) выводили на прибор «Сталь-4-RS-232».

Результаты промышленных испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты анализа состава металла и шлака, измерения активности кислорода в жидкой стали  $a_{[\text{O}]}$  и расчетной оценки  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$**

Номер плавки	Результаты измерения $a_{[\text{O}]}$ , %	Результаты анализа		$\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{расч}}$ , %	$\Delta \Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ , %
		[% Mn], %	$\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{эксп}}$ , %		
217	0,0004	11,5	3,44	3,34	2,91
123	0,0004	11,9	3,71	3,44	7,28
141	0,0004	12,0	3,71	3,50	5,66
206	0,0004	12,4	3,83	3,58	6,53
228	0,0005	11,3	4,44	4,11	7,43
197	0,0006	12,1	5,44	5,19	4,60
142	0,0006	12,5	5,65	5,39	4,60
128	0,0006	13,1	5,85	5,63	3,76
225	0,0007	11,8	6,05	5,88	2,81
116	0,0007	12,1	6,26	6,14	1,92
196	0,0007	12,7	6,54	6,35	2,91

Анализ полученных результатов показывает, что расчетные данные весьма близки к экспериментальным. Произведена оценка среднего отклонения расчетных и экспериментальных результатов по соотношению

$$\Delta\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) = \{ \Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{эксп}} - \Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{расч}} \} 100 / \Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})_{\text{эксп}}$$

Среднее отклонение их составляет 4,6 %. Это свидетельствует о высокой надежности метода прогнозирования  $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$  по данным измерения активности кислорода  $a_{[\text{O}]}$ .

**Выводы.** Показана возможность экспрессной оценки суммарного содержания (FeO + MnO) в шлаке по данным измерения активности кислорода в жидкой стали 110Г13Л. Метод апробирован в промышленных

условиях и показал высокую надежность результатов прогнозирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдов Н.Г., Ситнов В.В. Свойства, производство и применение высокомарганцевой стали. – М.: Машиностроение, 1996. – 232 с.
2. Житнов С.П., Давыдов Н.Г., Братчиков С.Г. Высокомарганцевые стали. – М.: Металлургия, 1995. – 302 с.
3. Теоретические основы сталеплавильных процессов / Айзатулов Р.С., Харлашин П.С., Протопопов Е.В., Назюта Л.Ю. – М.: МИСиС. 2002. – 320 с.
4. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия. 1987. – 272 с.
5. Кислородные зонды в сталеплавильном производстве / Лузгин В.П., Зинковский И.В., Покидышев В.В. и др. – М.: Металлургия, 1989. – 144 с.

© 2012 г. Э.Б. Тен, Е.Ю. Лихолобов  
Поступила 17 ноября 2011 г.

УДК 621.73

*В.А. Осадчий, Ю.Ю. Костюхин, А.В. Бузинов*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

## РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОСЫ В КЛЕТИ ПРОФИЛЕГИБОЧНОГО СТАНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наметилась устойчивая тенденция к применению все большего количества гнутых металлических профилей, особенно в строительной индустрии. Увеличились не только объемы их производства, но и существенно расширился сортамент.

Следствием популярности гнутых профилей, а так же относительной простоты некоторых моделей профилегибочных станков, является тенденция к установке линий производства на предприятиях, специализация которых не связана с металлургией. Фирме, у которой возникла потребность в широкой номенклатуре этих изделий, но объем производства не позволяет заказывать большие партии, бывает выгоднее построить собственную линию производства, чем покупать много мелких партий у внешних поставщиков.

Таким образом, особенно актуальным становится вопрос создания средств, облегчающих проектирование оборудования для производства гнутых профилей, в частности профилегибочных прокатных станков. Большинство таких средств частично автоматизируют расчеты различных характеристик процесса, что часто негативно сказывается на надежности полученных результатов – большинство используемых методик и формул получены эмпирически, а это влечет за собой необходимость постоянного экспертного контроля обрабатываемой информации.

Для автоматизации и этой функции необходимо создать систему, которая будет либо постоянно оценивать работу существующего проектирующего приложения, либо на высоком уровне моделировать уже спроектированный процесс.

Для моделирования формоизменения полосы в процессе прокатки самым мощным инструментом на данный момент является метод конечных элементов. Его можно использовать различными способами.

Стоит отметить, что этот метод, как и большинство других численных методов, практически не совместим с ручными расчетами. Трудоемкость решаемых задач определяется, в лучшем случае, системой из сотен линейных уравнений. Часто число уравнений можно снизить за счет внесения в их формирование элементарных дифференциальных преобразований, но это ведет к увеличению сложности их получения.

Для удобства использования МКЭ создано множество программ с открытым кодом, макросов для использования в приложениях уровня Math Lab, а так же узко ориентированных на решение определенного круга задач систем (например моделирование поведения электромагнитного поля или моделирование процессов течения в металлах при прессовании).

Многие из существующих систем представляют большой интерес и могут послужить исходной точкой