

Рис. 3. Изменение температуры поверхности верхней широкой грани сляба шириной 1560 мм при использовании существовавшего ранее (а) и опытного (б) режимов вторичного охлаждения: 1 – по центру грани; 2 – по углу грани

на участке разгиба приводила к образованию грубых поперечных трещин глубиной до 30 мм (рис. 1, а), появлению угловых поперечных и сетчатых трещин глубиной до 10 мм (рис. 1, б).

При дальнейшей прокатке слябов данные дефекты трансформировались в трещины и грубые плёны на поверхности горячекатаного листа (рис. 2).

Для решения первой проблемы – уменьшения образования окалины была осуществлена замена в первой зоне вторичного охлаждения охладителя – водовоздушной смеси на воду. Это благоприятно повлияло на увеличение продолжительности безаварийной работы МНЛЗ. Однако применение более «жесткого» водяного охлаждения обострило вторую проблему – переохлаждение углов слябовой заготовки в последующих зонах.

Для предотвращения воздействия факела водовоздушной смеси на углы слябов шириной до 1750 мм были заглушены крайние ряды форсунок во второй, третьей и четвертой зонах. Параллельно с этим было сокращено общее количество зон, участвующих в охлаждении сляба, – с девяти до шести. Всё это способствовало снижению удельного расхода воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

Для сравнительного анализа температуры поверх-

ности слябов при использовании существовавшего ранее и опытного режимов охлаждения было произведено пиromетрирование сляба со стороны малого радиуса по центру широкой грани и около угла. На одном ручье машины применялся существовавший ранее режим охлаждения, а на другом – опытный. На МНЛЗ разливалась сталь марки Ст. 3сп со скоростью вытягивания заготовок из кристаллизаторов, равной 0,7 м/мин. Температура измерялась при помощи высокоточного пирометра «Термоскоп-800». Результаты измерений представлены на рис. 3.

При использовании опытного режима охлаждения температура середины широкой грани сляба изменяется по более плавной кривой, чем при применении существовавшего ранее режима. Кривая изменения температуры угла опытного сляба располагается выше, чем кривая изменения температуры контрольного сляба. На участке разгиба сляба разница между этими температурами достигает примерно 50°С. При этом температура угла опытной заготовки не опускается ниже 945–885°С, в то время как температура контрольного сляба изменяется в интервале 900–830°С. Известно, что при температуре металла ниже 900°С резко возрастает опасность образования поперечных трещин на поверхности заготовки в процессе её деформации при разгибании из-за провала пластических свойств металла.

Сравнительная оценка качества поверхности 667 темплетов, отобранных из слябов различного марочного сортамента, показала, что на опытном металле в зависимости от интенсивности регламентируемых режимов охлаждения для разных групп марок стали – № 1, 2 или 3 количество поверхностных дефектов снизилось на 16–42% (отн).

Таким образом, проведённые мероприятия по совершенствованию режима вторичного охлаждения слябов непрерывно-литой заготовки с размерами поперечного сечения 250×(1250–1750) мм позволили существенно снизить аварийность при разливке стали на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком и улучшить качество поверхности отливаемой заготовки.

УДК 669.187.25

Алексеев Л.В., Столяров А.М.

ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ ПОЛУПРОДУКТА В СВЕРХМОЩНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С РАЗЛИЧНЫМ РАСХОДОМ ЖИДКОГО ЧУГУНА

В электросталеплавильном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» с 2006 года эксплуатируются две дуговые сталеплавильные печи (ДСП) фирмы «VAI-FUCHS» вместимостью по 180 т. Каждая электродуговая печь имеет удельный объём около 1,0 м³/т и оборудована многоступенчатым трансформатором удельной мощностью 0,83 МВА/т. Поэтому эти печи относятся к сверхмощным электрическим плавильным агрегатам. Для интенсификации процесса выплавки стали в ДСП предусмотрена возможность

применения в качестве шихтового материала жидкого чугуна в количестве до 40% от массы металлической шихты [1–3]. В настоящей работе предпринята попытка анализа влияния расхода жидкого чугуна на основные показатели работы электропечи, состав выплавляемого полупродукта и шлака.

Для решения этой задачи на первом этапе исследования было произведено сравнение результатов выплавки полупродукта 68 плавов для получения самой распространённой стали марки Ст. 3сп при рабо-

те ДСП с оставлением в агрегате «болота». Данные о средней продолжительности плавки в электропечи при расходе жидкого чугуна, изменявшемся в диапазоне от 0 до 41% (отн. массы введенной в печь металлической шихты), состоящей из металлического лома и жидкого чугуна), представлены на **рис. 1**.

Анализ представленных на **рис. 1** данных показывает, что на поле графика имеются две обособленные группы опытных точек. Первая группа точек для 63 плавки характеризует изменение продолжительности плавки при изменении расхода жидкого чугуна от 0 до 34% (отн.). В этой группе прослеживается четко выраженная тенденция к уменьшению продолжительности плавки при росте расхода жидкого чугуна в металлической шихте. На таких плавках заливка чугуна в печь производилась из одного ковша вместимостью до 65 т. При заливке чугуна из практически полного ковша (31–34% от массы металлической шихты) продолжительность плавки в ДСП была минимальной и равнялась в среднем 44,2 мин. Вторая группа точек для 5 плавки на **рис. 1** получена при расходе чугуна 35–41% (отн.). Для этой группы наблюдается резкое увеличение продолжительности плавки в электрической печи в среднем до 63 мин – более чем на 40% (отн.). Это объясняется как организационными причинами: возрастанием продолжительности заливки чугуна из-за необходимости использования двух чугуновозных ковшей и продолжительности скачивания из печи большего количества шлака с использованием, как правило, двух чаш, так и увеличением продолжительности окислительного периода электроплавки. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что расход жидкого чугуна более 34% от массы металлической шихты не является целесообразным.

На втором этапе исследования была произведена статистическая обработка данных 63 плавки, проведенных с расходом жидкого чугуна от 0 до 34% (отн.) при одноковшовом варианте заливки расплава в печь. Для выявления эмпирических зависимостей основных показателей работы ДСП и состава продуктов плавки от доли жидкого чугуна в металлической шихте использовались регрессионный и корреляционный анализы.

В процессе обработки было проанализировано влияние доли жидкого чугуна в металлической шихте ДСП на основные параметры: продолжительность плавки, продолжительность работы печи под током, производительность агрегата, массу полупродукта в ковше, относительную массу полупродукта в ковше (от массы металлической шихты), температуру полупродукта перед выпуском из печи, удельные расходы: кислорода, природного газа, электроэнергии, углеродсодержащего материала, расход извести, содержание в полупродукте перед выпуском из печи: углерода, марганца, серы, фосфора, хрома, никеля, меди, азота, окисленность металла, содержание в шлаке: оксида кальция, диоксида кремния, оксида марганца, оксида магния, оксида железа, пентоксида фосфора, серы, основность шлака, коэффициенты распределения серы и фосфора, удельную массу кремния и марганца для раскисления полупродукта в ковше.

В результате обработки опытных данных было установлено 15 статистически значимых зависимостей. Наиболее важными из них являются следующие. Так, с увеличением доли жидкого чугуна в металлической

шихте электроплавки ($g_{чуг}$, % от массы металлической шихты) происходит возрастание производительности ДСП ($p_{дсп}$, т/ч) и уменьшение удельного расхода электрической энергии для выплавки полупродукта ($g_{эл}$, кВт·ч/т) согласно прямолинейным зависимостям:

$$\begin{aligned} p_{дсп} &= 1,794g_{чуг} + 190,56, \\ r &= 0,7541; r_{0,001} = 0,4078; \\ F &= 1,586; F_{0,05} = 1,524; \\ t &= 0,0007; t_{0,05} = 1,98; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} g_{эл} &= 327,33 - 2,373g_{чуг}, \\ r &= -0,7527; r_{0,001} = 0,4078; \\ F &= 1,765; F_{0,05} = 1,524; \\ t &= 0,0004; t_{0,05} = 1,981. \end{aligned} \quad (2)$$

Графическое изображение зависимостей (1) и (2) представлено на **рис. 2**.

Характер полученных зависимостей (1) и (2) объясняется сокращением продолжительности работы печи под током и продолжительности всего цикла плавки в ДСП с ростом доли жидкого чугуна в металлической шихте до 34% (отн.). Это является следствием поступления в печь большего количества тепла как в виде физического тепла жидкого расплава, так и в виде тепла экзотермических реакций окисления примесей чугуна. В результате этого появилась возможность снижения удельного расхода природного газа, используемого для отопления электропечи. Большое количество образующегося шлака позволило усилить экранирующее воздействие на электрические дуги и уменьшить удельный расход углеродсодержащего материала, подаваемого в печь для вспенивания шлака. Величины всех вышеперечисленных параметров: продолжительности работы печи под током, продолжительности плавки полупродукта в ДСП, удельных расходов природного газа и углеродсодержащего материала статистически значимо зависят от доли жидкого чугуна в шихте электроплавки.



Рис. 1. Зависимость средней продолжительности плавки полупродукта для получения стали марки Ст. 3сп в дуговой сталеплавильной печи вместимостью 180 т от расхода жидкого чугуна в шихте до 41% (отн.)

На основании выявленных зависимостей можно сделать вывод о том, что для достижения наиболее высокой производительности сталеплавильного агрегата следует вести электроплавку с расходом жидкого чугуна в металлической шихте ДСП около 30% (отн.), особенно в настоящих условиях, когда стоимость жидкого чугуна неоправданно ниже стоимости металлического лома. Однако при дефиците жидкого чугуна вследствие снабжения электросталеплавильного цеха по остаточному принципу после удовлетворения потребностей высокопроизводительного кислородно-конвертерного цеха фактический расход чугуна составляет 21–25% (отн.) – в среднем около 23%. При возвращении к нормальному соотношению между стоимостью жидкого чугуна и лома данный расход окажется наиболее рациональным. Для такого среднего расхода чугуна в шихте ДСП характерны следующие расчётные показатели работы сталеплавильного агрегата:

производительность печи	232 т/ч;
продолжительность работы печи	
под током.....	32 мин;
продолжительность плавки	47 мин;
удельный расход электрической	
энергии.....	273 кВт·ч/т;
удельный расход углеродсодержащего	
материала.....	0,24 кг/т;
удельный расход природного газа.....	3,73 м ³ /т.

Увеличение в металлической шихте ДСП доли чугуна, содержащего меньшее количество примесей, ведёт к снижению содержания серы, никеля, меди и азота в выплавляемом полупродукте. На удаление серы и азота из расплава благоприятное влияние оказывает усиление барботажа ванны при окислении углерода,

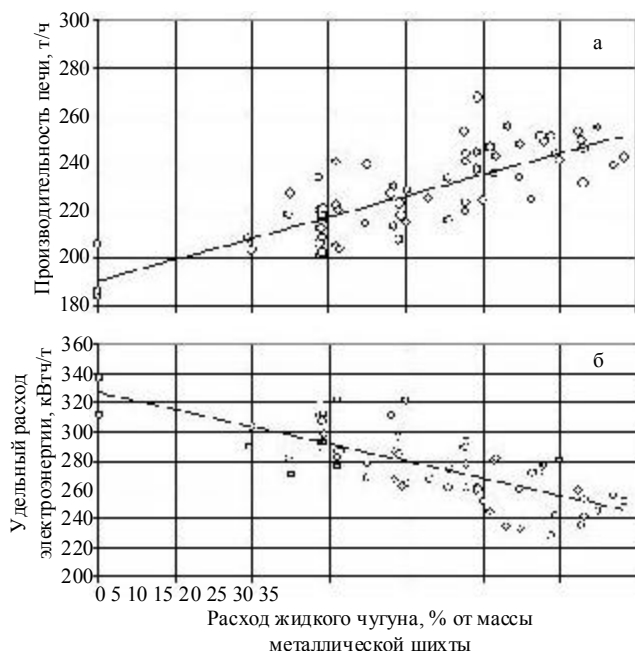


Рис. 2. Зависимость производительности дуговой сталеплавильной печи (а) и удельного расхода электроэнергии на выплавку полупродукта (б) от расхода жидкого чугуна в шихте до 34% (отн.)

внесённого чугуном. Зависимости содержания никеля, меди и азота в полупродукте перед выпуском из ДСП от расхода жидкого чугуна в шихте приведены на рис. 3.

Представленные на рис. 3 зависимости описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 [Ni] &= 0,1138 - 0,0013g_{\text{чуг}}, \\
 r &= -0,6196; r_{0,001} = 0,4078; \\
 F &= 2,689; F_{0,05} = 1,524; \\
 t &= 0,193; t_{0,05} = 1,983;
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 [Cu] &= 0,2048 - 0,0024g_{\text{чуг}}, \\
 r &= -0,5284; r_{0,001} = 0,4078; \\
 F &= 3,457; F_{0,05} = 1,524; \\
 t &= 0,175; t_{0,05} = 1,985.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 [N] &= 0,0065 - 0,0001g_{\text{чуг}}, \\
 r &= -0,7124; r_{0,001} = 0,4078; \\
 F &= 1,982; F_{0,05} = 1,524; \\
 t &= 0,003; t_{0,05} = 1,981.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Из рис. 3, в видно, что использование жидкого чугуна в шихте способствует получению приемлемого уровня содержания азота в металле, сопоставимого с его содержанием в кислородно-конвертерной стали. Диапазон изменения содержания азота в полупродукте перед выпуском из ДСП составляет 0,0030–0,0070% при среднем содержании 0,0044%.

При увеличении доли жидкого чугуна в шихте плавки полупродукта в ДСП происходит рост содержания углерода и марганца в металле перед выпуском из печи. Повышение содержания марганца объясняется использованием марганцовистого чугуна со средним содержанием этого элемента около 0,55%. Всё это вызывает уменьшение окисленности выплавляемого полупродукта. Зависимость активности кислорода ($a_{[O]}$, ppm) в полупродукте перед выпуском из ДСП от расхода жидкого чугуна представлена на рис. 4, а и характеризуется уравнением

$$\begin{aligned}
 a_{[O]} &= 1090 - 12,457g_{\text{чуг}}, \\
 r &= -0,5283; r_{0,001} = 0,4078; \\
 F &= 3,582; F_{0,05} = 1,524; \\
 t &= 0,0012; t_{0,05} = 1,986.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Следствием снижения окисленности металла является уменьшение удельной массы марганца (g_{Mn} , кг/т), вводимого в ферросплавах для раскисления полупродукта в ковше. Зависимость этого параметра от доли жидкого чугуна в шихте показана на рис. 4 б и выражается уравнением

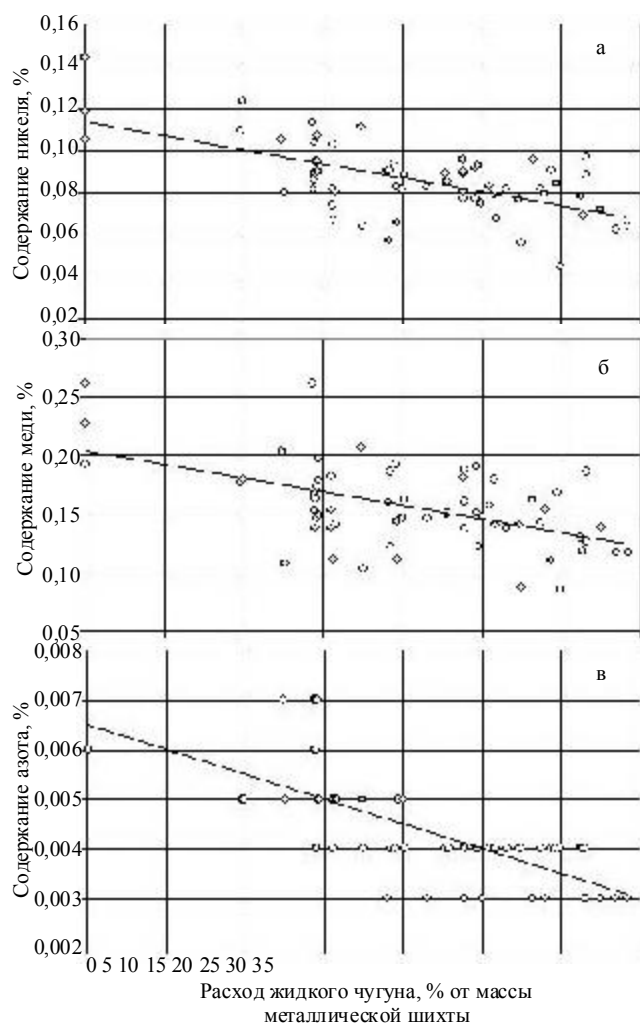


Рис. 3. Зависимости содержания никеля (а), меди (б) и азота (в) в полупродукте перед выпуском из ДСП от расхода жидкого чугуна в шихте до 34% (отн.)

$$g_{Mn} = 3,974 - 0,0332g_{чуг},$$

$$r = -0,5641; r_{0,001} = 0,4078;$$

$$F = 3,135; F_{0,05} = 1,524;$$

$$t = 0,013; t_{0,05} = 1,985.$$

При анализе параметров шлакового режима выяв-

Список литературы

1. Совершенствование технологии выплавки стали в ДСП ЭСПЦ ОАО «ММК» / А.В. Сарычев, Ю.А. Ивин, Л.В. Алексеев и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. № 1. С. 71–73.
2. Особенности работы дуговых сталеплавильных печей с применением жидкого чугуна (ОАО «ММК») / Ю.А. Ивин, А.Б. Великий, Н.В. Саранчук и др. // Сталь. 2008. № 7. С. 49–50.
3. Совершенствование шлакового режима выплавки стали в электропечи ЭСПЦ ОАО «ММК» / А.В. Сарычев, С.Н. Ушаков, Ю.А. Ивин и др. // Metallurg. 2008. № 8. С. 37–38.

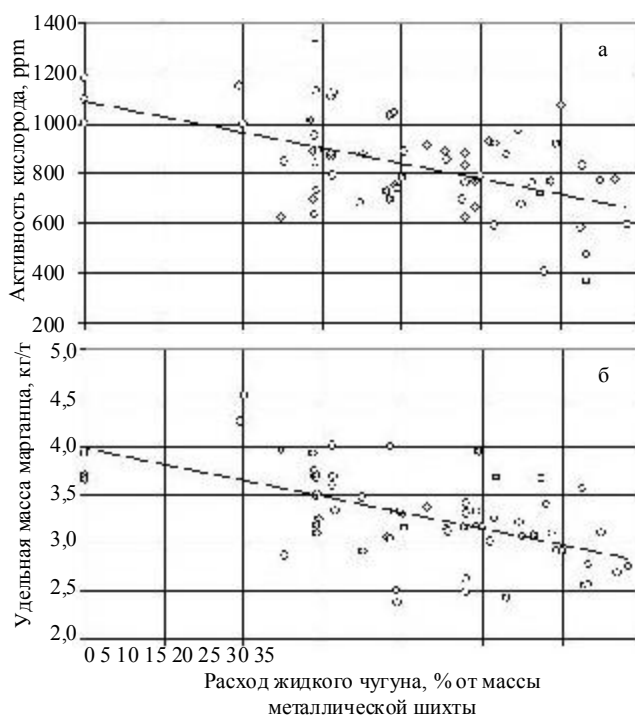


Рис. 4. Зависимости активности кислорода в полупродукте перед выпуском из ДСП (а) и удельной массы марганца для раскисления мегалла в ковше (б) от расхода жидкого чугуна в шихте до 34% (отн.)

лена только одна значимая зависимость между расходом чугуна и содержанием серы в шлаке. Содержание серы снижается при увеличении доли чугуна в шихте вследствие меньшего поступления этого элемента из шихты и образования большего количества шлака.

Таким образом, для достижения наиболее высокой производительности сталеплавильного агрегата в условиях меньшей стоимости жидкого чугуна по сравнению со стоимостью металлического лома плавки полупродукта в ДСП рекомендуется вести с долей жидкого чугуна в шихте около 30% (отн.). При возвращении к нормальному соотношению между стоимостью жидкого чугуна и лома рациональным расходом чугуна окажется существующий в настоящее время фактический расход, равный в среднем 23% (отн.). Применение жидкого чугуна в шихте ДСП способствует ресурсосбережению при выплавке полупродукта, снижению содержания в нём серы, никеля, меди, азота и кислорода.

List of literature

1. The technology enhancement of steel casting in the DSP ESPS of the OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” / A.V.Sarychev, U.A.Ivin, L.V.Alexeev and others // Vestnik of the MSTU named after G.I. Nosov. 2008. № 1. P. 71–73.
2. Operation peculiarities of the arc steel furnaces with hot metal (OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”) / U.A.Ivin, A.B.Veliky, N.V. Saranchuk and others // Steel. 2008. № 7. P. 49–50.
3. Enhancement of the slag adjustment of steel casting in the electric furnace ESPS of the OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” / A.V.Sarychev, S.N.Ushakov, U.A.Ivin and others // Metallurg. 2008. № 8. P. 37–38.