

СТРУКТУРА ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ВЫПЛАВКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

И.В. Фокин, Ю.А. Гудим

Изучена структура потерь металла при выплавке нержавеющей стали дуплекс-процессом, результаты сравнены с монопроцессом, предложены способы по снижению невозвратных потерь металла, предложена схема утилизации отвальных шлаков и пыли путем переплава в специализированном плавильном агрегате для восстановления части оксидов металлов и разделения полученного металла и шлака.

Ключевые слова: потери металла; монопроцесс; дуплекс-процесс; нержавеющая сталь, легированная титаном.

Современная технология производства нержавеющих сталей предусматривает использование нескольких плавильных агрегатов. Наиболее распространена схема: плавление шихты в дуговой сталеплавильной печи (ДСП), обезуглероживание легированного расплава в агрегате аргоноокислородного рафинирования (АКР) или в агрегате вакуум-кислородного обезуглероживания (ВКО), окончательная доводка стали по составу и температуре в агрегате ковш-печь (АКП). В некоторых случаях с целью более глубокого обезуглероживания и дегазации расплава после АКР легированный расплав дополнительно подвергают обработке на установке вакуум-кислородного обезуглероживания. Несмотря на довольно сложную схему производства нержавеющей стали, выход годного жидкого металла остается довольно низким. Целью предстоящей работы было изучение структуры потерь жидкого металла при выплавке нержавеющих сталей и разработка рекомендаций по их снижению.

На плавках аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали, производимых с взвешиванием шихтовых материалов и продуктов плавки на всех этапах производственного цикла, исследовали структуру потерь металла. Проведено под наблюдением 5 плавков стали 08X18H10T. Потери металла на разных этапах выплавки показаны в табл. 1.

При выплавке легированного полупродукта в сверхмощной дуговой печи потери металла колебались в пределах 3–9 % и составили в среднем 7,9 % от массы загружаемой шихты (см. табл. 1). Меньшие по сравнению с потерями на плавках нелегированной углеродистой стали (10–12 %), потери объясняются значительно меньшим расходом кислорода в дуговой печи на плавках нержавеющих сталей, использованием шихты с высоким содержанием углерода и меньшей температурой металла в конце плавки, и применением ферросилиция для раскисления печного шлака перед сливом плавки. После полного опорожнения дуговой печи (слив металла и шлака в передаточный ковш) металл заливали в АКР, предварительно скачав машинный шлак из передаточного ковша. Состав и кратность скачанного по ходу выплавки шлака приведены в табл. 2. Из приведенных данных видно, что содержание оксидов металлов в печном шлаке невелико при достаточно большом количестве шлака.

Потери металла в результате аргоноокислородного рафинирования и слива шлака из АКР составляют в среднем 4,5 % и колебались в пределах 4,2–6,0 %. Состав и количество шлака, слитого из АКР после завершения операции, приведены в табл. 2. Характерно довольно большое количество шлака и сравнительно низкое среднее содержание оксидов хрома при высоком содержании оксида кальция.

Таблица 1

Потери металла на различных этапах современного технологического цикла выплавки нержавеющей стали

Этап	Этап технологического цикла	Потери металла, % к массе исходного металла	
		Средние	Пределы колебаний
1	Выплавка полупродукта в дуговой печи, слив плавки и скачивание печного шлака из передаточного ковша	7,9	3,0–9,0
2	Обработка полупродукта в АКР, слив металла в сталеразливочный ковш, скачивание из ковша	4,5	4,2–6,0
3	Обработка металла на установке АКП, скачивание шлака	2,9	1,39–4,3
4	Обработка металла на установке ВКО	1,0	0,9–1,1

Таблица 2

**Средние состав и кратность шлака на различных этапах современного технологического цикла
выплавки нержавеющей стали**

Номер Этапа	Кратность шлака	Состав шлака, мас. %									
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	S	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	FeO
1	0,123	5,35	26,79	0,006	0,122	4,28	1,6	0,5	11,39	48,81	0,73
2	0,086	2,31	27,61	0,004	0,065	1,8	3,00	0,65	8,13	55,06	0,62
3	0,021	10,74	16,92	0,004	0,05	0,58	0,83	0,14	5,78	60,40	0,34
4	0,02	11,29	14,29	0,01	0,05	4,76	0,21	0,1	6,25	59,44	0,28

Потери металла при вакуум-кислородной обработке стали невелики. Состав и количество шлака, скачанного после вакуум-кислородной обработки, приведены в табл. 2.

Потери металла при обработке в агрегате ковш-печь и сливе шлака из ковша составили в среднем 2,9 % и вызваны в основном потерями со шлаком (см. табл. 2).

Средние суммарные потери металла в процессе выплавки нержавеющей стали составили 15 % от массы загружаемой шихты.

Как и при выплавке углеродистых сталей [1], основными структурными составляющими потерь металла при выплавке нержавеющей стали являются:

- потери со шлаком в виде оксидов металла;
- потери со шлаком в виде королек металла и скрапа;
- потери с пылью в виде оксидов металла.

Несмотря на большое количество шлака, потери в виде оксидов металлов на плавках нержавеющей стали дуплекс-процессом и триплекс-процессом сравнительно невелики из-за незначительного окисления металла при выплавке полу-

продукта в дуговой печи и хорошего раскисления шлака во время аргонокислородного рафинирования в АКР (табл. 3). Они существенно ниже, чем при выплавке нержавеющей стали монопроцессом в дуговой печи (см. табл. 3).

Основной структурной составляющей потерь металла при выплавке нержавеющей стали дуплекс и триплекс-процессами являются потери в виде скрапа (крупного и мелкого) и королек металла (см. табл. 3). Характерно, что содержание скрапа и королек в шлаке современных процессов и монопроцесса заметно отличаются (табл. 4).

Потери в виде оксидов металлов пыли, выделяющейся в процессе плавки полупродукта в дуговой печи и его обработки в АКР, вследствие сравнительно низких температур процесса, сравнительно невелики. Такая пыль содержит мало оксидов хрома и никеля и много оксидов железа (табл. 5) в отличие от пыли, выделяющейся из дуговых печей, выплавляющих нержавеющую сталь монопроцессом при более высоких температурах [2].

Для разработки технологических приемов, позволяющих улучшить технико-экономические по-

Таблица 3

Структура потерь металла при выплавке нержавеющей стали

Вид потерь	% от общей суммы потерь	
	Современная технология	Старый монопроцесс плавки в дуговых печах
Потери в виде оксидов шлака	5,8	29,2
Потери в виде оксидов пыли	0,9	3,7
Потери в виде крупного скрапа шлака	81,7	43,7
Мелкие скрапинки и корольки шлака	11,6	23,4

Таблица 4

Содержание скрапа и королек металла в шлаках выплавки нержавеющей стали

Технология плавки и этап плавки	Корольки, % к массе шлака	Мелкие скрапины, % к массе шлака	Крупные скрапины, % к массе шлака
Современная технология выплавки в дуговой печи, емкостью 110–135 т	1,6	2,4	4,56
Обработка металла в АКР	1,21	2,12	2,77
Монопроцесс в 40 т дуговой печи, скачаный перед легированием титаном шлак	2,36	3,75	13,33
Конечный шлак из ковша	3,3	5,54	12,2

Таблица 5

Состав и количество пыли, выделяющейся при выплавке
нержавеющей стали моно- и дулекс-процессами

Технология и этап плавки	% пыли от массы металла	Содержание, %						
		Fe _{общ}	NiO	Cr _{общ}	MnO	TiO ₂	SiO ₂	CaO
Современная технология плавки в дуговой печи	0,98	46,1	0,08	0,65	1,61	0,11	6,8	4,2
Процесс обработки в АКР	1,01	48,1	1,01	7,22	0,7	0,05	5,12	3,75
Монопроцесс в дуговой печи, период плавления	0,95	22,6	4,45	12,6	5,57	He опр.	6,15	9,12
Период продувки кислородом	1,55	31,6	7,81	16,84	8,35	He опр.	7,45	8,06

казатели процесса выплавки нержавеющей стали, важно уменьшить безвозвратные потери металла. К безвозвратным потерям металла можно отнести попадающие в шлаковый отвал:

- потери в виде оксидов металла шлака;
- потери в виде немагнитных мелкого скрапа и корольков металла;
- потери с пылью.

Крупный скрап из шлака, скрапины из шлаковых чаш, сталеразливочного ковша, так же как и отходы, получаемые при разливке и зачистке слэбов, подлежат сбору и переплаву на последующих плавках.

Результаты настоящего исследования позволяют рекомендовать следующие способы уменьшения безвозвратных потерь металла при выплавке нержавеющей стали:

- уменьшение количества шлака, используемого на различных этапах производства металла за счет снижения расхода шлакообразующих;
- уменьшение количества корольков в шлаке за счет более аккуратного скачивания шлака из сталеразливочных ковшей;
- вторичное использование отвального шлака в процессе выплавки нержавеющей и конструкционных сталей;
- переплав отвального шлака в специализированном гарнисажном плавильном агрегате с целью восстановления оксидов металлов, извлечения корольков металла и получения цементного клинкера;
- переплав пыли, уловленной при очистке газов, выделяющихся из ДСП и АКР, вместе с отвальными шлаками в специализированном гарнисажном плавильном агрегате с целью восстановления оксидов металла.

Некоторое снижение расхода шлакообразующих возможно при выплавке полупродукта в дуговой печи даже при работе без оставления «болота» в связи с относительно низкими температурами металла и шлака и малой продолжительностью плавки. Переход на работу с оставлением «болота» позволит заметно уменьшить расход свежих шлакообразующих и соответственно уменьшить количество печного шлака.

Существенное снижение расхода шлакообразующих и количества шлака в АКР вряд ли возможно, так как уменьшение расхода извести приведет к снижению основности шлака и при большой продолжительности процесса аргонокислородного рафинирования – к более интенсивному износу футеровки агрегата.

Попытки уменьшить безвозвратные потери нержавеющей металла эпизодически предпринимались ранее путем рециклинга отвальных шлаков [3, 4]. Эти промышленные эксперименты подтвердили возможность частичного уменьшения безвозвратных потерь высоколегированного металла путем вторичного использования отвального шлака монопроцессом производства нержавеющей стали на плавках конструкционных сталей, легированных хромом и никелем, и на плавках нержавеющей стали. Однако организационные трудности и низкая основность отвальных шлаков мешали более широкому опробованию и применению такого способа снижения безвозвратных потерь нержавеющей металла в старых цехах.

В современных цехах, использующих дулекс-процесс производства нержавеющей стали, вторичное использование печного шлака вполне осуществимо, особенно при выплавке полупродукта в дуговой печи. Шлаки, остающиеся в ковше после окончания разливки стали, вполне пригодны для вторичного использования в дуговой печи и АКР благодаря высокой основности и низкому содержанию серы и фосфора. Наиболее сложно осуществить вторичное использование шлаков из АКР. Такие шлаки можно применять при выплавке конструкционных сталей в дуговой печи вместо части свежей извести. Такой прием позволит ускорить процесс плавки в дуговой печи. Однако перечисленные способы вторичного использования отвальных шлаков производства нержавеющей стали даже в условиях современного цеха достаточно сложны в исполнении, не позволяют полностью использовать весь шлак и не обеспечивают возможность утилизации пыли, уловленной в газоочистных установках.

Полностью использовать отвальные шлаки и пыль, уловленную газоочистными устройствами,

плавков нержавеющей стали можно при организации переплава шлака и пыли в специализированном плавильном агрегате для восстановления части оксидов металла, содержащихся в шлаке и пыли, и разделения полученного металла и шлака, не содержащего включений металла.

В начале двухтысячных годов в Европе опробована технология ZEWA переработки отвальных шлаков нержавеющей стали [5]. Опытное промышленное опробование этой технологии проводили на заводе в Витковице, периодически проплавливая электрическими дугами отвальный шлак в большом сталеразливочном ковше на установке типа «ковш-печь». Расплавленный шлак восстанавливали присадками кокса и ферросилиция. В результате получали легированный металл и восстановленный шлак. Шлак был пригоден для вторичного использования в черной металлургии. Из-за низкой стойкости футеровки ковша эксперименты были прекращены.

Из вышесказанного следует, что для успешной переработки отвальных шлаков нержавеющей стали необходим гарнисажный плавильный агрегат, лучше непрерывного действия. В [6, 7] сообщается о создании гарнисажного плавильного агрегата непрерывного действия, пригодного для эффективной переработки отвальных шлаков. Высокая основность шлаков, получаемых при выплавке нержавеющей сталей по современным технологиям, позволяет получать при их переработке в гарнисажном плавильном агрегате высоколегированный металл и портланд-цементный клинкер. В таком случае эффективность переработки отвальных шлаков выплавки нержавеющей сталей будет значительно выше. Возможность осаждения королек легированного металла из шлака показана в [8].

Заключение

При производстве нержавеющей сталей дуплекс- или триплекс-процессом потери металла в процессе плавки достаточно велики. Невозвратные потери металла вызваны потерями со шлаком в виде королек мелкого скрапа и оксидов металла шлака, а также потерями с пылью, выделяющейся из дуговой печи и АКР. Уменьшение потерь металла может достигнуто за счет умень-

шения количества используемых шлаков, вторичного использования шлака на плавках нержавеющей и легированных конструкционных сталей и переплава отвальных шлаков в специализированном гарнисажном плавильном агрегате непрерывного действия.

Литература

1. Гудим, Ю.А. Потери металла при выплавке стали в дуговых печах и способы их уменьшения / Ю.А. Гудим, С.Г. Овчинников, И.Ю. Зинуров // *Электрометаллургия*. – 2010. – № 6. – С. 11–15.

2. Исследование запыленности отходящих газов при окислительной продувке хромоникелевого расплава / Ц.Л. Кацман, В.С. Галян, Л.Я. Рудашевский и др. // *Производство электростали: сб. МЧМ СССР*. – М.: Металлургия, 1980. – № 8. – С. 41–45.

3. Поволоцкий, Д.Я. Производство нержавеющей стали / Д.Я. Поволоцкий, Ю.А. Гудим. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. – 235 с.

4. Поволоцкий, Д.Я. Использование отвального шлака при выплавке нержавеющей сталей / Д.Я. Поволоцкий, Ю.А. Гудим, А.И. Якунин // *Производство электростали: сб. МЧМ СССР*. – М.: Металлургия, 1980. – № 8. – С. 50–53.

5. Флайшандел, А. ZEWA – новый процесс утилизации металлургических отходов / А. Флайшандел, У. Геннари, А. Алие // *Сталь*. – 2004. – № 12. – С. 118–123.

6. Гудим, Ю.А. Топливокислородный плавильный агрегат непрерывного действия, его применение в металлургии и для утилизации отходов / Ю.А. Гудим, А.А. Голубев, И.Ю. Зинуров // *Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2008. – Вып. 11, № 24 (124). – С. 16–23.

7. Современные способы безотходной утилизации сталеплавильных шлаков / Ю.А. Гудим, А.А. Голубев, С.Г. Овчинников, И.Ю. Зинуров // *Сталь*. – 2009. – № 7. – С. 93–95.

8. Металлургические королики в электропечном шлаке по ходу плавки / А.И. Строганов, Ю.А. Пыльнев, С.Т. Ушаков и др. // *Современные проблемы электрометаллургии стали: тр. всесоюз. конф.* – Челябинск, 1973. – С. 78–85.

Фокин Игорь Владимирович, старший научный сотрудник, ЗАО «Аконт». 454047, г. Челябинск, ул. Сталеваров, 7, офис 402. E-mail: ferrousmetallurgy@mail.ru.

Гудим Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, ООО «Промышленная компания «Технология металлов». 454106, г. Челябинск, ул. Косарева, 63. Тел.: (351)7963480. E-mail: kontakt-ru@technologya-metallov.com.

STRUCTURE OF METAL LOSSES DURING STAINLESS STEEL PRODUCTION

I.V. Fokin, JSC "Akont", Chelyabinsk, Russian Federation,
ferrousmetallurgy@mail.ru,

Yu.A. Gudim, LLC "Industrial company "Technologiya Metallov", Chelyabinsk,
Russian Federation, *kontakt-ru@technologiya-metallov.com*

The structure of metal losses during production of stainless steel by duplex process is studied in comparison with the monoprocess. The ways of decreasing irretrievable losses of metal are proposed, as well as a scheme of utilization storage slags and dust by melting in a special melting unit for deoxidation of metal oxides and separation of the received metal and slag.

Keywords: metal losses, monoprocess, duplex process, stainless steel with titanium.

References

1. Gudim Yu.A., Ovchinnikov S.G., Zinurov I.Yu. Metal Losses During Steelmaking in Arc Furnaces and Methods for Their Decreasing. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, no. 6, pp. 495–498. doi: 10.1134/S0036029511060103.
2. Katsman Ts.L., Galyan V.S, Rudashevskiy L.Ya. et al. Study of Dust Level of Waste Gas During Oxidizing Blow of Chromium-Nickel Melt [Issledovanie zapylennosti otkhodyashchikh gazov pri okislitel'noy produvke khromonikelevogo raspava]. *Proizvodstvo elektrostali* [Electric Steel Production]. No. 8. Moscow, Metallurgiya, 1980, pp. 41–45.
3. Povolotskii D.Ya., Gudim Yu.A. *Proizvodstvo nerzhavayushchey stali* [Stainless Steel Production]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 1998. 235 pp.
4. Povolotskii D.Ya., Gudim Yu.A., Yakunin A.I. Utilization of Waste Slag in Melting Stainless Steels [Ispol'zovanie otval'nogo shlaka pri vyplavke nerzhavayushchikh staley]. *Proizvodstvo elektrostali* [Electric Steel Production]. No. 8. Moscow, Metallurgiya, 1980, pp. 50–53.
5. Flayshandel A., Gennari U., Alie A. et al. ZEWA, a New Process for Utilization of Metallurgical Wastes. *Stal'*, 2004, no. 12, pp. 118–123.
6. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Zinurov I.Yu. A Continuous Fuel-Oxygen Melting Unit, Its Application in Metallurgy and for Utilization of Wastes [Toplivnokislородный плавильный агрегат непрерывного действия, его применение в металлургии и для утилизации отходов]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2008, no. 24 (124), issue 11, pp. 16–23.
7. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Ovchinnikov S.G., Zinurov I.Yu. Waste-Free Processing of Steel-Smelting Slag. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, no. 7, pp. 612–614. doi: 10.3103/S0967091209070237.
8. Stroganov A.I., Pyl'nev Yu.A., Ushakov S.T. et al. Metallurgical Globules in Electric Furnace Slag During the Melt [Metallurgicheskie korol'ki v elektropechnom shlake po khodu plavki]. *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali. Trudy vsesoyuznoy konferentsii* [Modern Problems of Electric Metallurgy of Steel. Proceedings of an All-Union Conference]. Chelyabinsk, 1973, pp. 78–85.

Поступила в редакцию 30 августа 2013 г.