

УДК 669.046.582.2

А.В. Харченко¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц. кафедры металлургии,
e-mail: odds@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3717-3872>, Web of Science ResearcherID: S-8907-2017

Р.В. Синяков², канд. техн. наук, ст. науч. сотр, начальник отдела конвертерного производства, e-mail: rvrs@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0003-4910-4444>

Н.В. Личконенко¹, ст. преподаватель кафедры металлургии, e-mail: nvlichkon75@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-7960-061X>, Web of Science ResearcherID: AAA-2713-2020

¹Инженерный институт Запорожского национального университета (Запорожье, Украина)

²Технологическая компания «Мин Цинь» (Пекин, КНР)

Вторичное электротермическое легирование и рафинирование низколегированной стали

В работе приведены схема установки и результаты исследований нового способа внепечной обработки стали, основанного на смещении равновесия в системе «металл-шлак-газ» под действием электрического заряда, приложенного к жидкому шлаку – вторичного электротермического легирования и рафинирования (ВЭЛР). Термодинамическое моделирование ВЭЛР на основе метода химических потенциалов Гиббса подтверждает высокую эффективность данного процесса и хорошо согласуется с полученными ранее результатами экспериментальных исследований. В зависимости от полярности электрического заряда, приложенного к шлаку, ВЭЛР может применяться как собственно для раскисления-легирования и десульфурации, так и для окислительного рафинирования и обезуглероживания жидкой стали. В работе выполнено исследование влияния удельного заряда шлака на давление газовой фазы, содержание примесей и легирующих элементов в процессе вторичного электротермического легирования и рафинирования низколегированной стали. Определены основные параметры ВЭЛР для технологических операций раскисления, легирования, десульфурации, дефосфорации, а также окислительного рафинирования и обезуглероживания жидкой стали. Для легирования стали щелочноземельными металлами технология ВЭЛР позволяет использовать металлургические шлаки вместо дефицитной порошковой проволоки, что, в свою очередь, способствует получению конкурентоспособной стали с минимальными затратами. В отличие от других методов внепечного легирования и рафинирования технология ВЭЛР имеет ряд преимуществ, в числе которых возможность частичной утилизации конвертерных и доменных шлаков, значительное уменьшение загрязнения стали неметаллическими включениями в процессе обработки, уменьшение выбросов и дымообразования, высокая экономическая эффективность.

Ключевые слова: сталь, легирование, рафинирование, заряд шлака, термодинамика, кальций, магний.

Введение. Вопрос о возможности использования технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования стали (ВЭЛР) неоднократно возникал при анализе распределения серы между металлом и шлаком в процессе электрошлакового переплава постоянным током. Так, в работе [1] было показано, что коэффициент распределения серы $(S)/[S]$ изменялся более чем в два раза при изменении полярности приложенного к электродам напряжения. Однако отсутствие адекватных физико-химических моделей многокомпонентных систем «металл-шлак-газ» не позволяло эффективно управлять данным процессом и оставляло лишь эм-

пирические возможности для разработки отдельных технологических приемов, не выходящих за рамки данного металлургического агрегата, данной технологии выплавки, заданной марки стали и заданного состава шлака. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с применением метода химических потенциалов Гиббса [2, 3] позволило разработать теоретические основы и технологию ВЭЛР.

В ряде работ по результатам теоретических и экспериментальных исследований были изложены возможности ВЭЛР по эффективному легированию и рафинированию жидкой стали [4–8]. Было показано, что использование метода ВЭЛР для

легирования низколегированной стали в модернизированных установках печь-ковш позволяет получить следующие основные преимущества:

1. Экономия дорогостоящих ферросплавов, синтетических шлаков и порошкообразных модификаторов.

2. Возможность утилизации рядовых конвертерных, мартеновских и доменных шлаков.

3. Возможность проведения десульфурации и дефосфорации без введения реагентов, повышающих содержание неметаллических включений.

4. Возможность введения в расплав высокоактивных легирующих добавок с максимальной степенью усвоения.

5. Уменьшенное газовыделение и пылеобразование по сравнению с существующими методами легирования и раскисления стали.

Одной из технологических особенностей ВЭЛР является существенное уменьшение массы шлака по ходу позитивного процесса, то есть процесса, в котором электрический заряд шлака является положительным. Как показывают теоретические расчеты, этот эффект сопровождается не только переходом анионов в металл, но и образованием газовой фазы при увеличении заряда шлака выше некоторого порогового уровня. Повышенный заряд шлака позволяет не только понизить содержание серы, кислорода и неметаллических включений в металле до сверхнизких величин, но и получить модифицированную сталь с высоким содержанием кальция и магния. Как известно, в абсолютном большинстве марок стали содержание этих элементов не регламентируется и фактически не превышает тысячных долей процента.

При проведении экспериментальных исследований [5] фиксировалось уменьшение массы шлака и интенсивное газообразование, однако вопрос о массе, давлении и составе газовой фазы оставался открытым. Следует отметить, что газообразование препятствует интенсификации позитивного процесса ВЭЛР и способствует уменьшению его эффективности, поскольку из шлака в газовую фазу уходят и безвозвратно теряются ценные легирующие элементы, такие как марганец, кальций и магний.

При рассмотрении влияния заряда шлака на процесс ВЭЛР возникает также вопрос о выборе подходящей удельной величины универсальной независимой переменной. Представляется целесообразным выбрать в качестве таковой отношение заряда шлака, выраженное в Фарадеях, к числу молей шлака. Поскольку один Фарадей (F) равен заряду одного моля электронов, то переменная, выбранная таким образом, будет показывать число элементарных зарядов, приходящихся на один атом (ион) шлака, с соответствующим знаком. Такая переменная в дальнейшем будет именоваться удельным зарядом шлака, обозначаться как q и иметь размерность $F/\text{моль}$.

Схема простейшей установки ВЭЛР приведена на рис. 1 [4, 9]. На жидкий шлак 3 через графитированные электроды специальной формы 5 подается постоянное напряжение от источника 6. Предполагается, что металл в печи-ковше постоянно перемешивается путем продувки инертным газом.

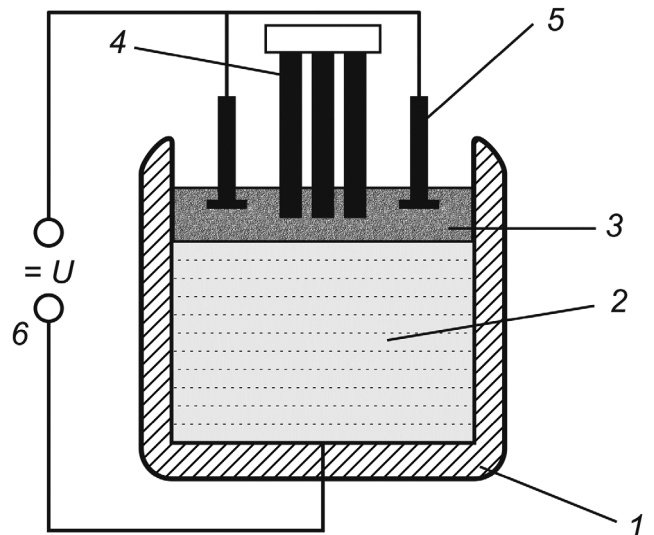


Рис. 1. Принципиальная схема ВЭЛР: 1 – кожух установки печь-ковш; 2 – расплав металла; 3 – жидкий шлак; 4 – электроды подогрева; 5 – электроды ВЭЛР; 6 – источник постоянного напряжения

Постановка задачи исследования. В работе ставится задача выполнить термодинамическое моделирование системы металл-шлак-газ в процессе ВЭЛР с учетом возможного газовыделения; определить массу, давление и состав газовой фазы; разработать технологию уменьшения потерь легирующих элементов при увеличении положительного заряда шлака; определить основные параметры ВЭЛР для низколегированных сталей.

Методика проведения экспериментов. В качестве объекта исследования выбрали раскисненную жидкую сталь марок 09Г2С, 12ГС и 30ГС при температуре 1600 °С, покрытую слоем равновесного шлака. Массу металла принимали равной 150 т, начальную массу шлака – 1,5 т. В составе печного шлака содержалось 20 % FeO, 20 % SiO₂, 10 % MnO, 45 % CaO, 3 % MgO, 1,5 % Al₂O₃, 0,3 % S и 0,2 % P₂O₅. Такой состав шлака является типичным для шлака окончания конвертерной плавки. Кроме того, вдобавок к низколегированным сталям, исследовали углеродистый полупродукт состава: 0,05 % С, 0,001 % Si, 0,12 % Mn, 0,035 % S, 0,015 % P. Такой же полупродукт использовали для получения низколегированных сталей.

Результаты исследований. Как видно на рис. 2, при изменении величины удельного заряда шлака q для каждой из рассматриваемых марок стали существует область спокойного металла с полным отсутствием газовыделения. Эта область расширяется при повышении внешнего давления. Данный факт может рассматриваться как очевидный элемент технологии уменьшения потерь анионов в газовой фазе при положительном процессе. При повышении удельного заряда шлака свыше $1 F/\text{моль}$ кривые давления ведут себя сходным образом для всех марок стали, выходя на горизонтальный участок при 180 кПа. Это означает, что повышением внешнего давления до 200 кПа можно добиться полного подавления газовыделения.

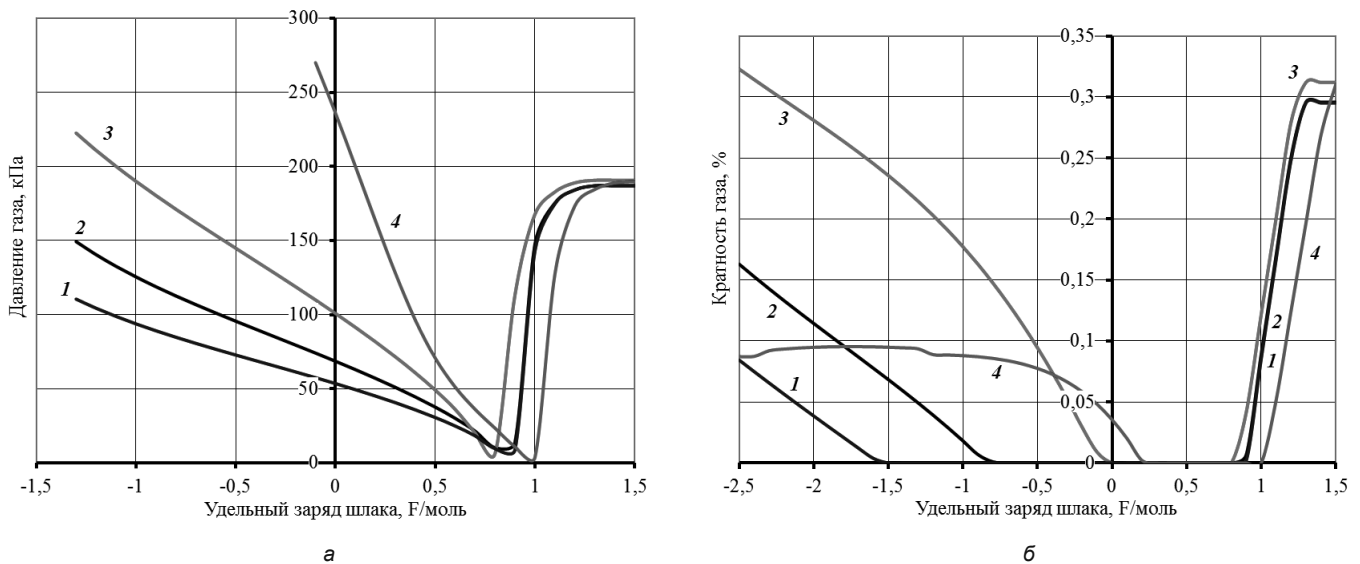


Рис. 2. Влияние удельного заряда шлака на давление (а) и кратность (б) газовой фазы: 1 – 09Г2С; 2 – 12ГС; 3 – 30ГС; 4 – полупродукт

Все кривые на рис. 2, а имеют характерные минимумы в интервале $q = 0,75-1,0$ F/моль, при которых жидкий металл приобретает устойчивость к вакуумированию, что важно учитывать при рафинирующих переплавах в вакууме с применением постоянного тока и наведением шлака. При снижении внешнего давления ниже значений на кривых начинается выделение газовой фазы, как видно на рис. 2, б. В суммарном давлении газовой фазы преобладает парциальное давление СО в левой ветви каждой кривой и парциальное давление паров Са и Mg в правой ее части.

Придание шлаку отрицательного заряда позволяет провести окислительное рафинирование, которое сопровождается переходом катионов кислорода в металл и встречным переходом анионов, в том числе фосфора, в шлак. При таком негативном процессе наблюдается увеличение массы шлака за счет окисления железа и других примесей. Кроме того, образуется газовая фаза с преобладанием СО в ре-

зультате окисления углерода в жидком металле. На рис. 3 показано изменение содержания углерода в стали при окислительном рафинировании в негативном процессе ВЭЛР. Для всех исследуемых сталей эта величина монотонно уменьшается при увеличении отрицательного удельного заряда до $-4,5$ F/моль. Горизонтальные участки кривых соответствуют упругости образования СО ниже внешнего атмосферного давления (100 кПа), когда выделение газовой фазы еще не началось.

В отличие от традиционного способа ввода щелочноземельных металлов в сталь в виде дорогостоящей порошковой проволоки с помощью трайбаппаратов технология ВЭЛР позволяет использовать для этого кальций и магний, содержащиеся в металлургических шлаках.

На рис. 4 и 5 показано влияние положительного заряда шлака на содержание кальция и магния в стали.

Очевидно, что относительно высокое парциальное давление паров кальция не позволяет получить высокое его содержание в стали при обычном атмосферном давлении, так что 0,04 % Са является пределом для всех исследуемых марок стали (рис. 4, а). Повышение внешнего давления до 200 кПа оказывается достаточным, чтобы довести содержание кальция в стали до 0,30–0,35 %, как видно на рис. 4, б. В этом случае большая часть кальция шлаковой фазы переходит не в газовую фазу, а в металл.

Следует отметить практически линейную зависимость содержания кальция от удельного заряда шлака на восходящих участках кривых при повышенном давлении. Это создает возможность надежного управления требуемым содержанием кальция в стали от следов до верхнего предела 0,35 %. Для дальнейшего увеличения содержания кальция в стали необходимо увеличивать долю СаО в шлаке и массу самого шлака.

Если содержание кальция в стали с увеличением положительного заряда шлака монотонно растет от весьма малых значений до верхнего предела, то со-

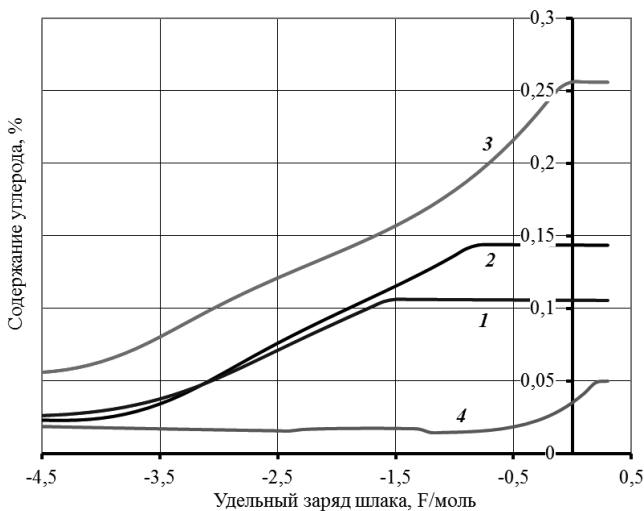


Рис. 3. Влияние удельного заряда шлака на содержание углерода в стали: 1 – 09Г2С; 2 – 12ГС; 3 – 30ГС; 4 – полупродукт

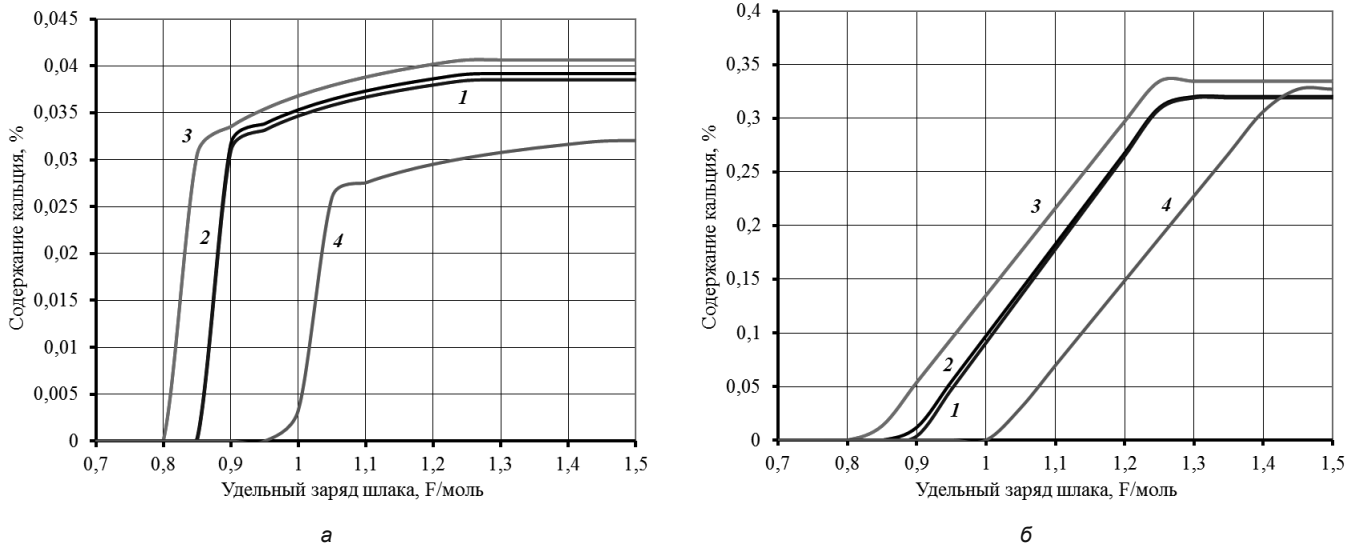


Рис. 4. Влияние удельного заряда шлака на содержание кальция в стали при внешнем давлении 100 кПа (а) и 200 кПа (б): 1 – 09Г2С; 2 – 12ГС; 3 – 30ГС; 4 – полупродукт

держание магния проходит через максимумы 0,020–0,026 %, приблизительно соответствующие минимальным давлениям образования газовой фазы, как видно на рис. 5, а. При дальнейшем увеличении заряда шлака содержание магния заметно уменьшается и стабилизируется на уровне 0,01 % при $q > 1,25$ F/моль. Это связано с тем, что часть магния уходит в газовую фазу. Повышение внешнего давления до 200 кПа практически устраняет максимум на кривых (рис. 5, б), но не увеличивает максимальное содержание магния в стали. Для получения стали с более высоким содержанием магния необходимо увеличивать долю MgO в шлаке.

Интересно отметить, что модифицированную сталь с высоким содержанием кальция и магния и сверхнизким содержанием серы и кислорода можно получить даже с использованием нелегированного полупродукта и конвертерного шлака.

На рис. 6, а проиллюстрировано, что как в позитивном, так и в негативном процессе можно добиться

существенного снижения содержания серы; кислород удаляется только в позитивном процессе (рис. 6, б).

В позитивном процессе наблюдается переход катионов кислорода и серы в шлак в результате смещения равновесия в подсистеме металл-шлак. В негативном процессе снижение содержания серы возможно за счет увеличения массы шлака и его сульфидной емкости. Однако после негативного процесса следует скачивать насыщенный примесями шлак и далее проводить позитивный процесс с новым шлаком для удаления из металла избыточного кислорода.

Теоретически с помощью ВЭЛР можно практически полностью удалить серу и кислород из металла за счет эффективного смещения равновесия в системе металл-шлак-газ. Однако при насыщении шлака кислородом и серой шлаковая фаза становится термодинамически нестабильной, и может начаться ее испарение раньше, чем произойдет полное удаление серы. Вопрос о термодинамической устойчивости

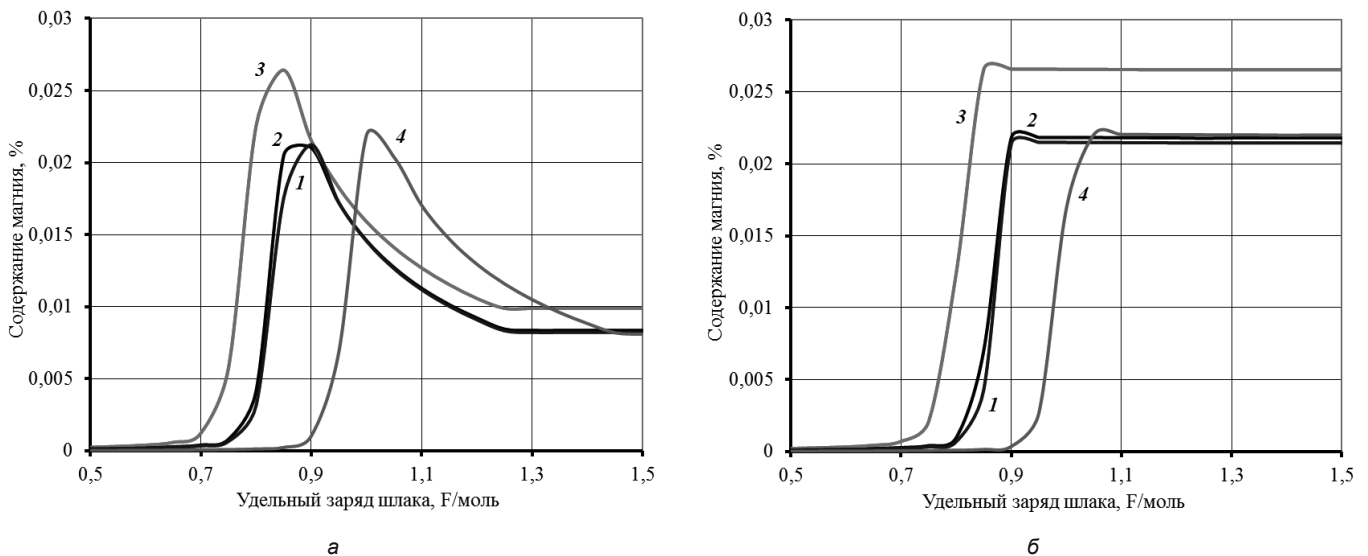


Рис. 5. Влияние удельного заряда шлака на содержание магния в стали при внешнем давлении 100 кПа (а) и 200 кПа (б): 1 – 09Г2С; 2 – 12ГС; 3 – 30ГС; 4 – полупродукт

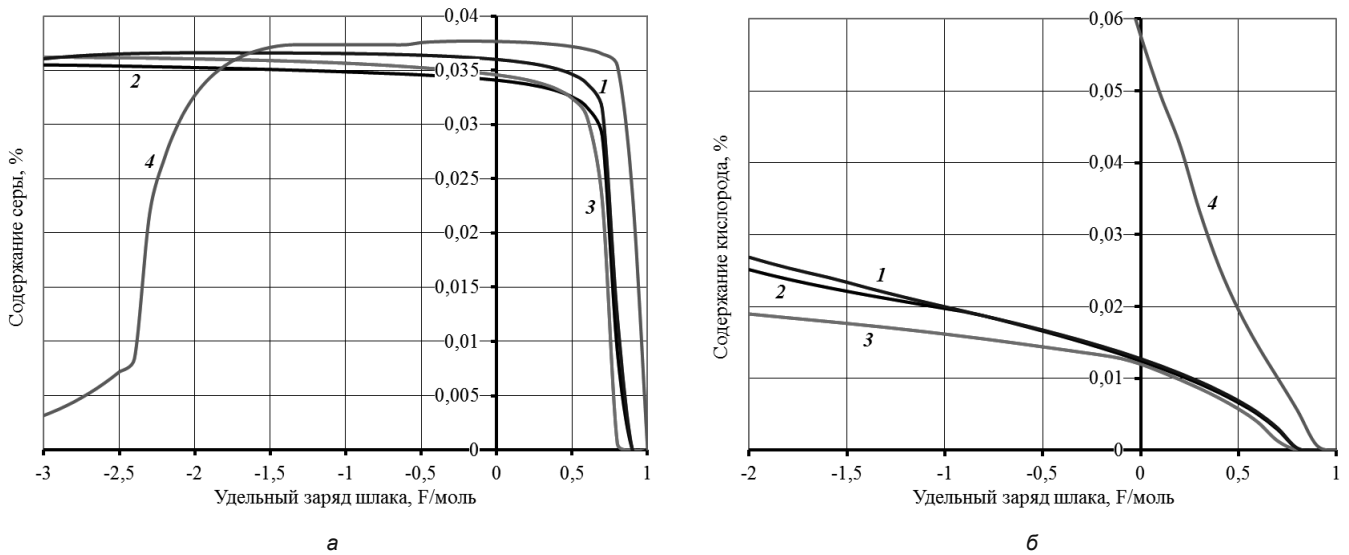


Рис. 6. Влияние удельного заряда шлака на содержание серы (а) и кислорода (б) в стали: 1 – 09Г2С; 2 – 12ГС; 3 – 30ГС; 4 – полупродукт

Основные параметры ВЭЛР при различных технологических операциях

Технологическая операция	Удельный заряд шлака, F/моль	Оптимальные параметры*) шлака и металла	Достижимый результат
Раскисление	0,4...0,5	≤ 20 % (FeO)	≤ 0,003 % [O]
Окислительное рафинирование, обезуглероживание	-4,5...-2,0	≥ 0,1 % [C]	≤ 0,03 % [C] ≤ 0,005 % [Si]
Десульфурация	0,6...0,8	≤ 20 % (FeO), ≤ 0,3 % (S)	≤ 0,003 % [S]
Дефосфорация	-2,0...-1,5	≤ 0,2 % (P ₂ O ₅), ≤ 0,1 % [Si]	≤ 0,005 % [P]
Легирование Mn, Si, Cr, Al	0,5...0,8	≤ 20 % (FeO), ≥ 10 % (MnO), (SiO ₂), (Cr ₂ O ₃), ≥ 5 % (Al ₂ O ₃)	Δ[Mn] = 0,15...0,30 % Δ[Si] = 0,10...0,50 % Δ[Cr] = 0,15...0,30 % Δ[Al] = 0,01...0,10 %
Легирование Ca, Mg	0,8...1,2	≤ 20 % (FeO), ≥ 20 % (CaO), ≥ 5 % (MgO)	0,035...0,35 % [Ca] 0,020...0,030 % [Mg]

*) Оптимальные параметры шлака и металла требуют корректировки применительно к другим маркам стали

неэлектронейтральной шлаковой фазы достаточно сложен и требует отдельного исследования, в том числе рассмотрения функции стабильности ψ , введенной Люписом [10].

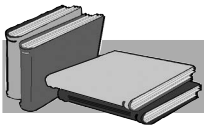
В таблице приведены основные параметры ВЭЛР при различных технологических операциях, в том числе удельный заряд шлака, оптимальные параметры шлака и металла и достигаемый результат.

Выводы

Термодинамическое моделирование ВЭЛР на основе метода химических потенциалов Гиббса подтверждает высокую эффективность данного процесса и хорошо согласуется с полученными ранее результатами экспериментальных исследований. В зависимости от полярности электрического заряда, приложенного к шлаку, ВЭЛР может применяться как

собственно для раскисления-легирования и десульфурации, так и для окислительного рафинирования и обезуглероживания жидкой стали.

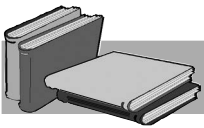
Установлено, что в процессе ВЭЛР увеличение как положительного, так и отрицательного удельного заряда шлака по абсолютной величине приводит к образованию газовой фазы, объем выделения которой зависит от внешнего давления. При атмосферном давлении в позитивном процессе значительная часть кальция уходит в газовую фазу, что не позволяет получить его содержание в стали свыше 0,04 %. Повышение внешнего давления до 200 кПа при удельном заряде шлака $q \geq 1$ F/моль увеличивает верхний предел содержания кальция в стали до 0,35 %. Для легирования стали щелочноземельными металлами технология ВЭЛР позволяет использовать металлургические шлаки вместо дорогостоящей порошковой проволоки.



ЛІТЕРАТУРА

1. Дакуорт У.Э., Хойл Г. Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1973. 192 с.
2. Харченко А.В., Синяков Р.В., Личконенко Н.В. Применение метода химических потенциалов Гиббса в черной металлургии. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2017. Вип. 2 (38). С. 20–25.
3. Харченко А.В., Синяков Р.В. Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2016. Вип. 2 (36). С. 16–22.
4. Харченко А.В., Личконенко Н.В., Горяйнова Н.В. Вторичное легирование и рафинирование стали в установках пещковш. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2012. Вип. 1 (26). С. 17–21.
5. Харченко А.В., Лаптев Д.А., Лупол Д.А. и др. Экспериментальные исследования технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2014. Вип. 1 (31). С. 30–35.
6. Харченко А.В., Кириченко А.Г., Белоконь Ю.А. и др. Термодинамика и кинетика процесса вторичного электротермического легирования и рафинирования металла. *Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. 2015. Вип. 1 (33). С. 9–13.
7. Харченко А.В., Личконенко Н.В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование металла с участием газовой фазы. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2016. Вип. 1 (35). С. 9–13.
8. Харченко А.В., Синяков Р.В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование стали. *Зб. наукових праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра»*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 11.04.2017, Київ. С. 1208–1218.
9. Патент України № 132087. МПК: C21C 7/06 (2016.01), u201809172. Спосіб позапічної обробки сталі / О.В. Харченко, Р.В. Синяков, С.А. Воденніков, Н.В. Лічконенко; заявл. 06.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3. 5 с.
10. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. М.: Металлургия, 1989. 503 с.

Надійшла 10.10.2019



REFERENCES

1. Duckworth, W.E., Hoyle, G. (1973). *Electroslag Refining*. Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
2. Kharchenko, A.V., Sinyakov, R.V., Lichkonenko, N.V. (2017). Application of the Gibbs method of chemical potentials in ferrous metallurgy. *Metallurgy: Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy*, iss. 2 (38), pp. 20–25 [in Russian].
3. Kharchenko, A.V., Sinyakov, R.V. (2016). Thermodynamic model of a multicomponent liquid slag phase. *Metallurgy: Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy*, iss. 2 (36), pp. 16–22 [in Russian].
4. Kharchenko, A.V., Lichkonenko, N.V., Goryainova, N.V. (2012). Secondary alloying and refining of steel in ladle furnace units. *Metallurgy: Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy*, iss. 1 (26), pp. 17–21 [in Russian].
5. Kharchenko, A.V., Laptev, D.A., Lupol, D.A. et al. (2014). Experimental studies of the technology of secondary electrothermal alloying and refining. *Metallurgy: Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy*, iss. 1 (31), pp. 30–35 [in Russian].
6. Kharchenko, A.V., Kirichenko A.G., Belokon, Yu.A. et al. (2015). Thermodynamics and kinetics of the process of secondary electro-thermal alloying and metal refining. *Metallurgy: Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy*, iss. 1 (33), pp. 9–13 [in Russian].
7. Kharchenko, A.V., Lichkonenko, N.V. (2016). Secondary electro-thermal alloying and refining of a metal with the participation of the gas phase. *Metallurgy: Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy*, iss. 1 (35), pp. 9–13 [in Russian].
8. Kharchenko, A.V., Sinyakov, R.V. (2017). Secondary electro-thermal alloying and refining of steel. *Proceedings of XV All-Ukrainian Scientific-Practical Conference "Special metallurgy: yesterday, today, and tomorrow"*, KPI im. Igor Sikorsky, 04/11/2017, Kyiv, pp. 1208–1218 [in Russian].
9. Kharchenko, O.V., Sinyakov, R.V., Vodennikov, S.A., Lichkonenko, N.V. (2019). Method of out-of-furnace steel processing. Ukrainian Patent no. 132087, MPK: C21C 7/06 (2016.01), u201809172. State Register of Patents Ukraine on the useful model 02/11/2019, zaivl. 06.09.2018; opubl. 11.02.2019, Biul. no. 3, 5 p. [in Ukrainian].
10. Lupis, K. (1989). *Chemical thermodynamics of materials*. Moscow: Metallurgiya, 503 p. [in Russian].

Received 10.10.2019

Анотація

О.В. Харченко¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., доц. кафедри металургії, e-mail: odds@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3717-3872>, Web of Science ResearcherID: S-8907-2017

Р.В. Синяков², канд. техн. наук, ст. наук. співр., начальник відділу конвертерного виробництва, e-mail: rvsr@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4910-4444>

Н.В. Лічконенко¹, ст. викладач кафедри металургії, e-mail: nvlichkon75@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7960-061X>, Web of Science ResearcherID: AAA-2713-2020

¹Інженерний інститут Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

²Технологічна компанія «Мін Цинь» (Пекін, КНР)

Вторинне електротермічне легування і рафінування низьколегованої сталі

В роботі наведено схему установки і результати досліджень нового способу позапічної обробки сталі, заснованого на зміщенні рівноваги в системі «метал-шлак-газ» під дією електричного заряду, прикладеного до рідкого шлаку – вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР). Термодинамічне моделювання ВЕЛР на основі методу хімічних потенціалів Гіббса підтверджує високу ефективність даного процесу і добре узгоджується з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень. Залежно від полярності електричного заряду, прикладеного до шлаку, ВЕЛР може застосовуватися як власне для розкислення-легування і десульфурації, так і для окислювального рафінування та зневуглецювання рідкої сталі. У роботі виконано дослідження впливу питомого заряду шлаку на тиск газової фази, вміст домішок і легуючих елементів в процесі вторинного електротермічного легування та рафінування низьколегованої сталі. Визначено основні параметри ВЕЛР для технологічних операцій розкислення, легування, десульфурації, дефосфорації, а також окислювального рафінування та зневуглецювання рідкої сталі. Для легування сталі лужноземельними металами технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дефіцитного порошкового дроту, що, в свою чергу, сприяє отриманню конкурентоспроможної сталі з мінімальними витратами. На відміну від інших методів позапічного легування та рафінування технологія ВЕЛР має ряд переваг, в числі яких можливість часткової утилізації конвертерних і доменних шлаків, значне зменшення забруднення сталі неметалевими включеннями в процесі обробки, зменшення викидів і димоутворення, висока економічна ефективність.

Ключові слова

Сталь, легування, рафінування, заряд шлаку, термодинаміка, кальцій, магній.

Summary

A.V. Kharchenko¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Associate Professor at the Department of Metallurgy, e-mail: odds@i.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3717-3872>, Web of Science ResearcherID: S-8907-2017
R.V. Sinyakov², PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Head of Converter Production Department, e-mail: rvsr@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4910-4444>
N.V. Lichkonenko¹, Senior Lecturer at the Department of Metallurgy, e-mail: nvlichkon75@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7960-061X>, Web of Science ResearcherID: AAA-2713-2020

¹*Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)*

²*Ming Xing Technology Company (Beijing, China)*

Secondary electrothermal alloying and refining of low-alloyed steel

The paper presents unit general scheme and research results for a new method of out-of-furnace steel processing based on an equilibrium shift in the metal-slag-gas system under the action of an electric charge applied to liquid slag – secondary electrothermal alloying and refining (SEAR). Thermodynamic modeling of SEAR based on the Gibbs method of chemical potentials confirms the high efficiency of this process and is in good agreement with the experimental results obtained previously. Depending on the polarity of the electric charge applied to the slag, SEAR can be used both for deoxidation, alloying, and desulfurization, as well as for oxidative refining and decarburization of liquid steel. The study reveals the influence of the specific charge of slag on the pressure of the gas phase, the content of impurities and alloying elements in the process of secondary electrothermal alloying and refining of low-alloyed steel. The main parameters of SEAR for technological operations of deoxidation, alloying, desulfurization, dephosphorization, and also oxidative refining and decarburization of liquid steel are determined. For alloying steel with alkaline earth metals, the SEAR technology allows the use of metallurgical slag instead of scarce flux-cored wire, which, in turn, contributes to the production of competitive steel with minimal cost. Unlike other methods of out-of-furnace alloying and refining, SEAR technology has several advantages, including the possibility of partial utilization of converter and blast furnace slag, a significant reduction in pollution by non-metallic inclusions during processing, reduction of emissions and smoke generation, and high economic efficiency.

Keywords

Steel, alloying, refining, slag charge, thermodynamics, calcium, magnesium.