



Б. Кашакашвили /к. т. н./,
И. Кашакашвили /к. т. н./, О. Микадзе /д. т. н./

Языково-информационный фонд Грузии,
г. Тбилиси, Грузия
e-mail: beno@cdn.ge; iqasho@mail.ru;
omikadze@hotmail.com

Энергетическая оценка инновационной технологии производства стали в ковше-печи

B. Kashakashvili /Cand. Sci. (Tech.)/,
I. Kashakashvili /Cand. Sci. (Tech.)/,
O. Mikadze /Dr. Sci. (Tech.)/

Georgian Linguistic-Information fund, Tbilisi, Georgia
e-mail: beno@cdn.ge; iqasho@mail.ru;
omikadze@hotmail.com

Energy assessment of innovative technology of steelmaking in a ladle furnace

Цель. Энергетическая оценка инновационной технологии выплавки стали в ковше-печи. Вычисление расхода природного газа для выплавки и науглероживания стали в зависимости от мощности ковша-печи и садки плавки.

Методика. Выбраны данные и последовательность вычисления расхода природного газа для выплавки и науглероживания стали в зависимости от мощности ковша-печи и садки плавки. При этом учтено, что сталеразливочный ковш нагревается за счёт отбора тепла у жидкой стали, охлаждая её. Количество тепла для выплавки стали вычислено суммированием энтальпии нагретого до температуры плавления стального лома с энтальпией жидкой стали и со скрытой теплотой её плавления за вычетом тепла от электрических дуг ковша-печи, а делением полученного результата на низшую теплоту сгорания природного газа вычислено необходимое для выплавки стали количество вдуваемого в ковш-печь природного газа. При расчёте расхода природного газа для науглероживания стали вычислены частные и суммарная массы углерода в алканах 1 м^3 природного газа при нормальных условиях.

Результаты. Выполнена энергетическая оценка инновационной технологии выплавки стали в ковше-печи. Вычислен расход природного газа для выплавки и науглероживания стали в зависимости от мощности ковша-печи и садки плавки.

Научная новизна. Разработана инновационная технология выплавки, раскисления и обработки стали с применением только одного агрегата вместо двух – сверхмощной дуговой сталеплавильной печи и ковша-печи и проведена энергетическая оценка этой технологии.

Практическая значимость. Применение разработанной технологии позволит без использования сверхмощной дуговой сталеплавильной печи (с её мощными трансформаторами и низким КПД) или другого сталеплавильного агрегата плавить, доводить, раскислять, рафинировать сталь в ковше-печи и разливать её из ковша этого же агрегата. Этим исключаются: перегрев стали на $90\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$ над температурой ликвидуса; сопутствующие выплавке в печах организованные и неорганизованные выбросы; тяжёлый ручной труд при футеровании сталеплавильных агрегатов, их желобов и открытии-закрытии лётков. В результате улучшится качество стали. (Табл. 4. Библиогр.: 6 назв.).

Ключевые слова: выплавка, сталь, ковш-печь, дуга, факел, природный газ, воздух, кислород, науглероживание, обезуглероживание, рафинирование, разливка.

Постановка проблемы. Сталь во всём мире сначала плавят в конвертерах, электродуговых или других печах преимущественно обезуглероживанием, а затем её сливают в сталеразливочный ковш агрегата комплексной обработки, где осуществляют процессы её раскисления-легирования и обработки инертными газами и шлакообразующими смесями для десульфурации, гомогенизации её химического состава и температуры, уменьшения в ней количества неметаллических включений и газов. При этом традиционная технология производства стали имеет следующие существенные недостатки:

1) Для компенсации потери температуры при выпуске на жёлобе, в сталеразливочном ковше и во время разливки, плавку во всех плавильных агрегатах перегревают на $90\div 150 \text{ }^\circ\text{C}$ выше номинальной температуры, что вызывает существенный перерасход топлива, электроэнергии, огнеупоров, других материалов, снижение производительности агрегата и качества стали вследствие увеличения количества неметаллических включений (особенно, газовых).

2) Каждая заданная марка стали требует соответствующего расчётного содержания углерода при расплавлении, однако часты случаи «мяг-

ких» расплавлений по углероду, перешихтовок, подвалок и доливок чугуна, перегрузов плавов, основного оборудования, потерь металла, срывов заказов заданных марок сталей с ухудшением их качества, аварийных ситуаций при выплавке и разливке.

3) Выпуск стали из плавильного агрегата сопровождается её вторичным окислением, значительными потерями, снижением качества, увеличением расхода раскислителей, страшным загрязнением атмосферы, ухудшением условий труда вместе с экологическими показателями плавильного агрегата, предприятия и региона.

4) В связи с тем, что производство стали во всём мире растёт в основном за счёт ввода сверхмощных электродуговых печей, резкое увеличение потребления электроэнергии создаёт для будущего угрозу уже сегодняшним уровнем её дефицита и кризиса во всём мире.

5) Сооружение плавильных агрегатов – конвертеров и электродуговых печей с мощными трансформаторами – требует огромных капитальных затрат при строительстве современных сталеплавильных цехов.

6) Помимо огромных капложений, расходы на эксплуатацию и капитальные ремонты этих агрегатов, материальные и трудовые затраты очень велики и удорожают себестоимость стали.

Формулировка цели. Недостатки применяемой в настоящее время технологии ликвидированы в разработанных нами вариантах производства стали в одном агрегате ковш-печь. В процессе разработки этой технологии сначала на Руставском металлургическом комбинате были проведены эксперименты по выплавке стали глубинной продувкой газовой смеси через затрамбованную в сталевапускное отверстие мартеновской печи мощную горелку, по внутренней трубе которой подавали сжатый воздух, а по наружной – природный газ. Эксперименты проведены при различных объёмах вдуваемого воздуха по ходу опытных плавов как на жидком, так и на твёрдом чугуне. Все опытные плавки, в отличие от сравнительных, были выпущены с помощью разливочного крана без применения тяжёлого ручного труда сталеваров. Продолжительность плавов (как на жидком, так и на твёрдом чугуне), удельный расход топлива и других дорогостоящих материалов сократились вдвое [1].

По ходу этих плавов было замечено науглероживание железистого расплава при его интенсивном кипении и установлено, что степень науглероживания зависит от температуры и отношения объёмов вдуваемого воздуха (кислорода) и природного газа, а за обнаружение этих новых закономерностей науглерожи-

вания сталеплавильной ванны получены 2 диплома на научные открытия № 390 и 416 [2; 3].

На основании вышеуказанных научных открытий и большого опыта обработки стали в сталеразливочном ковше азотом и шлакообразующими реагентами сквозь разливочное отверстие шиберного затвора Руставским способом, который был внедрён в России и Украине, а лицензия на эту технологию продана фирме «Крупн и Маннесманн», авторами статьи разработана новейшая технология выплавки, раскисления, обработки и разливки стали применением одного агрегата вместо двух дорогостоящих – сверхмощной сталеплавильной печи и агрегата внепечной обработки стали [1; 4].

Варианты этой инновационной технологии запатентованы в России, Китае и Грузии [1]. Применение этой технологии позволит без использования сверхмощной дуговой сталеплавильной печи (с её мощными трансформаторами и низким КПД) плавить, доводить, раскислять, рафинировать сталь в ковше-печи и разливать её из ковша этого же агрегата. Этим исключаются: перегрев стали на 90–150 °С над температурой ликвидуса; сопутствующие выплавке в печах организованные и неорганизованные выбросы; тяжёлый ручной труд при кладке сталеплавильных агрегатов, их желобов и открытии-закрытии сталевапускных отверстий; вторичное окисление стали. В результате уменьшается содержание неметаллических (особенно газовых) включений в ней и улучшается её качество.

Расплавление шихты и нагрева расплава при выплавке стали в модернизированном агрегате ковш-печь производится сверху электрическими дугами и снизу факелом природного газа и воздуха (кислорода), вдуваемых через шиберный затвор. Аналогично вдуваются аргон или азот и шлакообразующие реагенты для рафинирования стали, а её разливка с номинальной температурой производится из этого же ковша. В процессе выплавки стали железистый расплав по желанию можно науглероживать и обезуглероживать изменением соотношения вдуваемых объёмов воздуха (кислорода) и природного газа.

Целью исследования является энергетическая оценка инновационной технологии выплавки-рафинирования стали в одном модернизированном агрегате ковш-печь, вычисление расходов природного газа (из газопровода Шибелинка – Днепропетровск), необходимого для нагрева-расплавления стального лома и нагрева жидкой стали до оптимальной температуры 1550 °С в зависимости от мощности ковша-печи и садки плавки, а также – для внесения в сталь 0,30 % углерода.

СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Методика исследования и фактический материал. Если для оценочного расчёта принять, что сталеразливочный ковш нагревается за счёт отбора тепла у нагретой за 1 час до 1700 °С стали, охлаждая её на 150 °С, то сталь будет нагрета в ковше-печи до оптимальной температуры 1550 °С.

Для расплавления стального лома и нагрева стали до 1700 °С, согласно расчёту по формуле $Q_{ст} = 0,7t_{пл} + 260 + 0,87(t_{факт} - t_{пл})$, кДж/кг [5], необходимое количество тепла составляет 1,478 МДж/кг, т. е. 1,478 ГДж/т, считая, что температура плавления стали $t_{пл} = 1500$ °С, её теплоёмкость в твёрдом и жидком состояниях, соответственно, – 0,7 и 0,84 кДж/(кг·К), $0,7t_{пл}$ кДж – энтальпия твердой стали, нагретой до температуры плавления, $0,84(t_{факт} - t_{пл})$ кДж – энтальпия жидкой стали, 260 кДж/кг – скрытая теплота плавления стали. Часть необходимого тепла выделяется дугами ковша-печи, а остальная её часть должна быть получена от сжигания природного газа.

С учётом вышеизложенного в табл. 1 приводятся результаты вычисления расхода природного газа из вышеуказанного газопровода, необходимого для нагрева-расплавления стального лома и нагрева жидкой стали до оптимальной температуры 1550 °С в зависимости от мощности ковша-печи и садки плавки.

В табл. 2 приведён химический состав природного газа из газопровода Шебелинка – Днепропетровск [6].

В табл. 3 приведены результаты вычисления содержания углерода в природном газе из газопровода Шебелинка – Днепропетровск. Частные массы углерода в килограммах для нормальных условий в алканах 1 м^3 природного газа рассчитаны по следующей формуле: $Ч = О \cdot К : 22,4 : 100$, где: О – объёмный процент алкана в природном газе; К – выраженная в килограммах сумма атомных масс всех атомов углерода в алкане; 22,4 – объём (в литрах) 1 моля газа при нормальных условиях, а 100 – коэффициент для перевода объёмного процента в объёмный процент.

Таблица 1

Результаты вычисления расхода природного газа из газопровода Шебелинка-Днепропетровск, необходимого для нагрева-расплавления стального лома и нагрева жидкой стали до 1550 °С в ковше-печи

Садка плавки	Мощность трансформатора ковша-печи	Удельная активная мощность ковша-печи при cosφ = 0,78	Удельный расход электроэнергии ковша-печи при cosφ = 0,78	Удельный приход тепла ковша-печи	Удельный расход тепла на нагрев стали в ковше-печи до 1550 °С	Недостающее удельное количество тепла	Низшая теплота сгорания природного газа из газопровода Шебелинка-Днепропетровск.	Эквивалентный удельный расход природного газа	Расход природного газа	Минутный расход газа
т	МВА	кВт/т	кВт.ч/т	ГДж/т	ГДж/т	ГДж/т	МДж/м ³	м ³ /т	м ³	м ³ /мин
150	25	130	130	0,468	1,478	1,010	37,31	27	4061	68
130	25	150	150	0,540	1,478	0,938	37,31	25	3268	54
125	25	156	156	0,562	1,478	0,916	37,31	25	3070	51
120	25	163	163	0,585	1,478	0,893	37,31	24	2872	48
100	25	195	195	0,702	1,478	0,776	37,31	21	2080	35
200	45	176	176	0,632	1,478	0,846	37,31	23	4536	76
150	45	234	234	0,842	1,478	0,636	37,31	17	2555	43
140	45	251	251	0,903	1,478	0,575	37,31	15	2159	36
130	45	270	270	0,972	1,478	0,506	37,31	14	1763	29
125	45	281	281	1,011	1,478	0,467	37,31	13	1565	26
120	45	293	293	1,053	1,478	0,425	37,31	11	1367	23
100	45	351	351	1,264	1,478	0,214	37,31	6	575	10

Таблица 2

Химический состав и низшая теплота сгорания природного газа из газопровода Шебелинка – Днепропетровск

Химический состав (% по объёму) и низшая теплота сгорания 1 кубометра природного газа							
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	МДж/м ³
92,8	3,9	1	0,4	0,3	1,5	0,1	37,31

Содержание углерода в алканах природного газа из газопровода Шебелинка – Днепропетровск

Частные (Ч) и суммарная (ΣC) массы углерода в алканах 1 кубического метра природного газа в нормальных условиях, кг/м ³					
Ч					ΣC
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂ (более)	
0,497	0,042	0,016	0,009	0,008	0,572

ёмную долю. Суммарная масса углерода (ΣC) в алканах 1 кубического метра природного газа при нормальных условиях вычислена сложением частных масс углерода в каждом алкане того же газа.

В табл. 4 приведены результаты расчёта необходимого расхода газа в кубических метрах для внесения в сталь 0,30 % углерода по массе от садки плавки. Расчёт произведён по формуле $P = 0,30 \% \cdot M : 100 \% : \Sigma C$, где: 0,30 % – процентная доля внесённого в сталь углерода; M – садка плавки, кг; $\Sigma C = 0,572$ кг/м³ – суммарная масса (кг) углерода в алканах 1 м³ природного газа из газопровода Шебелинка – Днепропетровск (из табл. 3).

Таблица 4

Расход природного газа из газопровода Шебелинка – Днепропетровск для внесения в сталь 0,30 % углерода по массе от садки плавки

Садка плавки	т	200	150	130	125	120	100
Расход газа	м ³	1049	787	682	656	629	524

Выводы

1. Выполнена энергетическая оценка технологии выплавки стали в ковше-печи. Установлено, что для расплавления стального лома и нагрева стали до 1700 °С необходимое количество тепла составляет 1,478 ГДж/т.

2. Установлены необходимое количество природного газа из газопровода Шебелинка – Днепропетровск для нагрева-расплавления стального лома и нагрева жидкой стали до 1550 °С в зависимости от мощности ковша-печи и садки плавки, а также – для внесения в сталь 0,30 % углерода по массе от садки плавки.

Библиографический список / References

1. Кашакашвили Г. Б. Усовершенствованная технология выплавки-рафинирования и разливки стали с применением одного агрегата / Г. Б. Кашакашвили, О. Н. Сосковец, И. Г. Кашакашвили, Б. Г. Кашакашвили, Д. Д. Сванадзе // Сборник трудов XIV Международного конгресса сталеплавателей и производителей металла. Секция 4. Разливка и кристаллизация стали (Электросталь, 17–21 октября 2016 г.). – Москва: Электросталь, 2016. – С. 577–581.

Kashakashvili G. B., Soskovets O. N., Kashakashvili I. G., Kashakashvili B. G., Svanadze D. D. *Usovershenstvovannaya tekhnologiya vyplavki-rafinirovaniya i razlivki stali s primeneniem odnogo agregata*. Sbornik trudov XIV Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov i proizvoditeley metalla. Sektsiya 4. Razlivka i kristallizatsiya stali (Elektrostal', 17-21 oktyabrya 2016 g.). Moscow, Elektrostal'. 2016, pp. 577-581.

2. Кашакашвили Г. Б. Закономерность изменения содержания углерода в жидкой стали от температуры нагрева при её продувке газовой смесью. Научное открытие № 390. Регистрационный № 490. Дата регистрации 9 февраля 2010 г. / Г. Б. Кашакашвили, Б. Г. Кашакашвили, И. Г. Кашакашвили // Научные открытия – 2010: Сборник кратких описаний научных открытий, научных гипотез. – М.: РАЕН, 2011. – С. 20–21.

Kashakashvili G. B., Kashakashvili B. G., Kashakashvili I. G. *Zakonomernost' izmeneniya sodержaniya ugleroda v zhidkoy stali ot temperatury nagreva pri ee produvke gazovozdushnoy smes'yu*. Nauchnoe otkrytie no. 390. Registratsionnyy no. 490. Data registratsii 9 fevralya 2010 g. Nauchnye otkrytiya-2010: Sbornik kratkikh opisaniy nauchnykh otkrytiy, nauchnykh gipotez. Moscow, RAEN, 2011, pp. 20-21.

3. Кашакашвили Г., Кашакашвили И., Кашакашвили Б. Закономерность науглероживания жидкой сталеплавильной ванны при её глубинной продувке газовой смесью. Научное открытие № 416. Регистрационный № 521. Дата регистрации 18 мая 2011 г. / Г. Кашакашвили, И. Кашакашвили, Б. Кашакашвили // Научные открытия, идеи, гипотезы. – 2008–2012: Информационно-аналитический обзор / В. В. Потоцкий. – М.: РАЕН, 2013. – С. 117–118.

Kashakashvili G., Kashakashvili I., Kashakashvili B. *Zakonomernost' nauglerozhivaniya zhidkoy staleplavil'noy vanny pri ee glubinnoy produvke gazovozdushnoy smes'yu*. Nauchnoe otkrytie no. 416. Registratsionnyy no. 521. Data registratsii 18 maya 2011 g. Nauchnye otkrytiya, idei, gipotezy. 2008-2012: Informatsionno-analiticheskiy obzor. Moscow, RAEN, 2013, pp. 117-118.

4. Кашакашвили Г. Б. Основанные на новых закономерностях процессы производства ста-

ли / Г. Б. Кашакашвили, Б. Г. Кашакашвили, И. Г. Кашакашвили // Сборник трудов XIII Международного конгресса сталеплавильщиков. Секция 1. Металлургия стали (Полевской, 12–18 октября 2014 г.). – Полевской. – С. 105–109.

Kashakashvili G. B., Kashakashvili B. G., Kashakashvili I. G. *Osnovannye na novykh zakonomernostyakh protsessy proizvodstva stali*. Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov. Sektsiya 1. Metallurgiya stali. (Polevskoy, 12-18 oktyabrya 2014 g.). Polevskoy, pp. 105-109.

5. Кудрин В. А. *Металлургия стали: учебник для вузов* / В. А. Кудрин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – С. 235.

Kudrin V. A. *Metallurgiya stali*. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya, 1989, p. 235.

6. Средний состав природного газа, его теплота сгорания, плотность, объёмы воздуха и продуктов сгорания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.allbeton.ru/upload/mediawiki/96f/gaz-prirodnyy-sredniy-sostav-teplota-sgoraniya-plotnost-obemy-vozdukha-i-produktov-sgoraniya.pdf>

Sredniy sostav prirodnogo gaza, ego teplota sgoraniya, plotnost', obemy vozdukha i produktov sgoraniya. Available at: <https://www.allbeton.ru/upload/mediawiki/96f/gaz-prirodnyy-sredniy-sostav-teplota-sgoraniya-plotnost-obemy-vozdukha-i-produktov-sgoraniya.pdf>

Purpose. Energy assessment of innovative technology of steel smelting in a ladle furnace. Calculation of natural gas consumption for smelting and carburization of steel, depending on the power of the ladle furnace and charge of melt.

Methodology. The data and the sequence of calculation of the natural gas consumption for the smelting and carburizing of the steel depending on the power of the ladle furnace and charge of melt are selected. At the same time, it is taken into account that

the steel casting ladle is heated by taking heat from liquid steel, cooling it. The amount of heat for steel smelting is calculated by summing the enthalpy of heated to the melting temperature steel scrap with the enthalpy of liquid steel and with the latent heat of its melting, minus the heat of electric arcs of ladle furnace and by dividing obtained result on the lower heat of combustion of natural gas it's necessary amount injected into the ladle-furnace for smelting steel is calculated. During calculation of the natural gas consumption for steel carburization are calculated partial and total masses of carbon in alkanes of 1 cubic meter of natural gas under normal conditions.

Findings. Energy assessment of innovative technology of steel smelting in a ladle furnace is completed. Natural gas consumption for smelting and carburization of steel depending on the power of the ladle furnace and charge of melt is calculated.

Originality. An innovative technology for melting, deoxidizing and processing steel with the use of only one unit instead of two – steelmaking super-powerful arc furnace and complex steel processing unit has been developed and an energy evaluation of this technology has been carried out.

Practical value. The application of the developed technology will allow to melt, finish, deoxidate, refine steel in a ladle furnace and to pour it out of the ladle of the same unit without using a steelmaking super-powerful arc furnace (with its powerful transformers and low efficiency) or another steelmaking unit. This excludes: superheating of steel by 90–150 °C over the liquidus temperature; organized and unorganized emissions accompanying to smelting in furnaces; heavy hand work during lining of steelmaking units, their runners and opening-closing of tapholes. As a result, the quality of steel will improve.

Key words: smelting, steel, ladle furnace, arc, torch, natural gas, air, oxygen, carburization, decarburization, refining, casting.

Рекомендована к публикации
д. т. н. К. Г. Низяевым

Поступила 10.01.2017

