

---

.УДК 046.51+669.046.55]-026.65

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-02>

**Харченко Олександр Вікторович**, докторант, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORSID: 0000-0003-3717-3872

**Лічконенко Наталія Володимирівна**, старший викладач, Запорізький національний університет. ORSID: 0000-0003-3717-3872

## ТЕПЛОВІ ЕФЕКТИ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ ТА РАФІНУВАННЯ СТАЛІ

Виконано аналіз теплових ефектів матеріалів та електроенергії за позапічної обробки сталей 09Г2С і 35ХГСА із застосуванням технології вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР). Розглянуто особливості змінювання теплових ефектів матеріалів залежно від питомого заряду шлаку та частки внесених матеріалів. Отримано формули для розрахунку теплових ефектів матеріалів під час позапічної обробки рідкої сталі. Розраховано теплові ефекти матеріалів, включаючи феросплави, карбід кремнію, вапно і електроенергію. Зроблено узагальнюючі висновки відносно чинників, що впливають на теплові ефекти за введенням матеріалів до рідкої сталі.

Ключові слова: сталь, метал, шлак, температура, тепловий ефект, феросплав, розкислювання, легування

*Вступ.* Процес вторинного електротермічного легування та рафінування сталі (ВЕЛР) є відносно новою розробкою [1-5], заснованою на використанні методу хімічних потенціалів Гіббса та вирішенні компактної системи рівнянь матеріального і теплового балансів, а також рівняння електронейтральності шлаку з ненульовим зарядом [7-14]. ВЕЛР з позитивним зарядом шлаку супроводжується зменшенням маси шлаку, поглинанням теплоти та зниженням температури розплаву [5]. Чим більшим є питомий заряд шлаку, тим більше знижуються його маса і температура. Тому особливого значення для технології процесу ВЕЛР набуває контроль і підтримка температури розплаву за рахунок врахування теплових ефектів матеріалів та електроенергії. У роботі [6] наведено результати експериментального визначення теплових ефектів деяких феросплавів під час їх введення до рідкої сталі. Проте ці дані мають обмежене застосування, оскільки були отримані за деяких усереднених умов, де не визначено такі важливі показники, як температура, хімічний склад, окисленість і співвідношення мас металу та шлаку.

Залежно від поточного стану системи «метал-шлак-газ» теплові ефекти можуть бути як позитивними, так і негативними, тобто введення до розплаву легуючих матеріалів може призводити як до підвищення, так і до зниження температури розплаву. Теплові ефекти матеріалів, зокрема феросплавів, зумовлені складною взаємодією елементів, що входять до їх складу, з рідкою сталлю та шлаком. Існують три основні складові такої взаємодії:

1. Поглинання фізичної теплоти розплаву матеріалом з температурою довкілля. Ступінь зниження температури розплаву залежить від температури та теплоємності матеріалу і самого розплаву.

2. Неідеальність багатоконпонентного металевого розчину. Залежно від відхилення від закону Рауля можливим є як поглинання, так і виділення теплоти. Зокрема, розплави заліза з алюмінієм і кремнієм мають значне негативне відхилення від закону Рауля. Додавання матеріалів, до складу яких входять такі елементи, дозволяє одержати значний позитивний тепловий ефект незалежно від міри окисленості системи [15-16].

3. Взаємодія елементів з киснем, що розчинено в рідкому металі, з утворенням оксидної фази (розкислювання). Ця складова істотно залежить від міри окисленості системи

«метал-шлак-газ». Зокрема, для окислених систем кремній- і алюмовмісні матеріали демонструють значний екзотермічний ефект [17].

Кожна з перерахованих складових залежить від теплоємності металу, шлаку та газу, що становлять систему. Окрім того, сама технологія ВЕЛР є додатковим чинником, що впливає як на процес розкислювання, так і на процес окислення металу залежно від полярності заряду шлаку. При цьому відбувається або поглинання теплоти за позитивним зарядом або її виділення за негативним зарядом шлаку [5].

*Постановка завдання.* У роботі поставлено завдання дослідження теплових (термічних) ефектів, що виникають під час вторинного електротермічного легування та рафінування низьколегованих сталей марок 09Г2С і 35ХГСА за різного рівня питомого заряду шлаку, у тому числі теплові ефекти матеріалів і електроенергії. Ці сталі істотно відрізняються одна від одної вмістом вуглецю, отже, рівень окисленості металу під час їх виплавки та позапічної обробки за інших рівних умов також буде різним.

*Основна частина дослідження.* У загальному випадку тепловий ефект визначається частинною похідною температури системи «метал-шлак-газ»  $T$  за масою матеріалу  $M$ , що витрачається, за витраченою електроенергією або за зарядом шлаку. Для матеріалу тепловий ефект має розмірність [К/кг] чи [К/т] і визначається виразом

$$W = \frac{\partial T}{\partial M}. \quad (1)$$

Часто витрату матеріалів визначають відносно маси рідкого металу  $M_m$ . В цьому разі тепловий ефект має розмірність [К/(кг/т)] і визначається частинною похідною за питомою масою матеріалу:

$$W = \frac{\partial T}{\partial(M/M_m)}. \quad (2)$$

Визначення теплового ефекту  $j$ -го матеріалу за рівняннями (1) або (2) є нетривіальним завданням. Для цього потрібно неявно продиференціювати систему рівнянь матеріального та теплового балансів  $\mathbf{F} = \mathbf{0}$  за масою даного матеріалу  $M_j$  [11-12]:

$$\partial_i = \begin{bmatrix} \partial \mu_e / \partial M_j \\ \partial Y / \partial M_j \\ \partial Z / \partial M_j \\ \partial T / \partial M_j \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial M_j \\ \partial F_2 / \partial M_j \\ \partial F_3 / \partial M_j \\ \partial F_4 / \partial M_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\mu_e$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $T$  – шукані змінні системи рівнянь, у тому числі  $\mu_e$  – рівень Фермі електронів в шлаку (окислювально-відновний потенціал),  $Y$  – логарифм зворотної молярної кратності шлаку;  $Z$  – логарифм зворотної молярної кратності газу,  $T$  – температура системи «метал-шлак-газ»;  $F_1, F_2, F_3, F_4$  – ліві частини системи рівнянь;  $\mathbf{J}$  – матриця Якобі системи рівнянь, яка визначається диференціюванням кожного рівняння за кожною шуканою змінною.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i^2 \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}} v_i}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \frac{N_s^2}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)}^2}{n_i} & \frac{N_s N_g}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}}}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}} v_i}{n_i} & \frac{N_s N_g}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{\{i\}}}{n_i} & \frac{N_g^2}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{\{i\}}^2}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{\{i\}} (h_i^M - h_{\{i\}}^M) \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i (h_i^M - h_{(i)}^M) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) & \sum_{i=1}^k n_{\{i\}} (h_i^M - h_{\{i\}}^M) & C_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $k$  – кількість контрольованих хімічних елементів;  $n_{[l]}, n_{(i)}, n_{(i)}, n_i$  – числа молей  $i$ -го елемента відповідно у металі, шлаку, газі та системі;  $N_s, N_g, N$  – загальне число молей відповідно у шлаку, газі та системі;  $C_p$  – повна теплоємність системи «метал-шлак-газ»;  $h_{[l]}^M, h_{(i)}^M, h_{(i)}^M, h_i^M$  – парціальні мольні ентальпії змішування відповідно у металі, шлаку, газі та системі;  $v_i$  – валентність  $i$ -го елемента в шлаку.

Аналітичний вираз для парціальних ентальпій, що входять до формули (4), існує тільки для металу та шлаку [8,9,13]. Тому доцільно визначити їх чисельним диференціюванням парціальної енергії Гіббса кожної із фаз, включаючи газову, за температурою, використовуючи рівняння Гіббса-Гельмгольца. Парціальна мольна ентальпія змішування в системі визначається виразом:

$$h_i^M = \frac{\partial H^M}{\partial n_i} = \sum_{l=1}^k \left( h_{[l]}^M \frac{\partial n_{[l]}}{\partial n_i} + h_{(l)}^M \frac{\partial n_{(l)}}{\partial n_i} + h_{(l)}^M \frac{\partial n_{(l)}}{\partial n_i} \right), \quad (5)$$

у якому похідні числа молей у фазах за загальним числом молей  $i$ -го елемента визначено як *диференціальні коефіцієнти засвоєння* елементів відповідно у металі, шлаку та газі [7].

Вектор похідних за масами матеріалів у правій частині (3) визначається виразом, отриманим диференціюванням складної функції за числом молей кожного хімічного елемента в системі:

$$\begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial M_j \\ \partial F_2 / \partial M_j \\ \partial F_3 / \partial M_j \\ \partial F_4 / \partial M_j \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^k \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial n_i} \frac{\partial n_i}{\partial M_j} = \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} Q_s + \frac{n_{(i)} v_i}{n_i} \\ \frac{n_{(i)}}{N_s} - \frac{N}{N} \\ \frac{n_{(i)}}{N_g} - \frac{N}{N} \\ \frac{n_i}{N} \\ h_i^M - H_j^M \end{bmatrix} \frac{B_{ij}}{A_i}, \quad (6)$$

де  $Q_s$  – надлишковий заряд шлаку, зумовлений технологією ВЕЛР;  $B_{ij}$  – масова доля  $i$ -го хімічного елемента в  $j$ -му матеріалі;  $H_j^M$  – мольна ентальпія  $j$ -го матеріалу;  $A_i$  – атомна маса  $i$ -го хімічного елемента.

Слід зазначити, що отримані формули дозволяють визначити не лише теплові ефекти матеріалів, але і вплив кожного матеріалу на фазовий і хімічний склад системи «метал-шлак-газ» в результаті перерозподілу в ній хімічних елементів.

Найтипovіший випадок змінування температури розплаву із збільшенням частки внесених матеріалів подано на рис. 1,а. Екстремальний вигляд кривих є характерним за будь-яким рівнем заряду шлаку. Максимальна температура спостерігається за внесенням менше 20% матеріалів, вказаних у табл. 1. Максимум пояснюється екзотермічним ефектом під час розкислювання напівпродукту, що спочатку містить 0,05...0,12% кисню. За подальшим збільшенням маси внесених матеріалів екзотермічний ефект знижується із-за синхронного зниження вмісту кисню в рідкій сталі.

Таблиця 1 – Оптимальні маси матеріалів, які використовують для легування 150 т сталей 09Г2С і 35ХГСА, т

Сталь	ФМн78	МнС17	ФС65	ФХ800Б	ФСХ33	АВ-87	Карбід Si	Вапно
09Г2С	1,26	1,68	1,06	-	-	0,05	-	-
35ХГСА	1,41	-	-	0,37	3,96	0,10	1,16	1,22

На рис. 1,б наведено графіки змінювання температури розплаву під час обробки низьколегованих сталей за технологією ВЕЛР. В результаті відновних процесів відбувається зменшення маси шлаку, поглинання теплоти та помітне зниження температури розплаву, яке необхідно компенсувати додатковим введенням електроенергії.

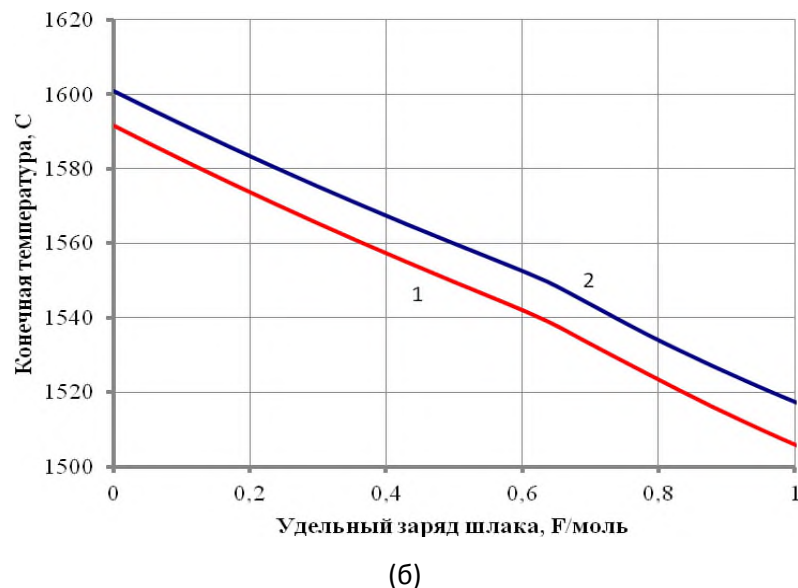
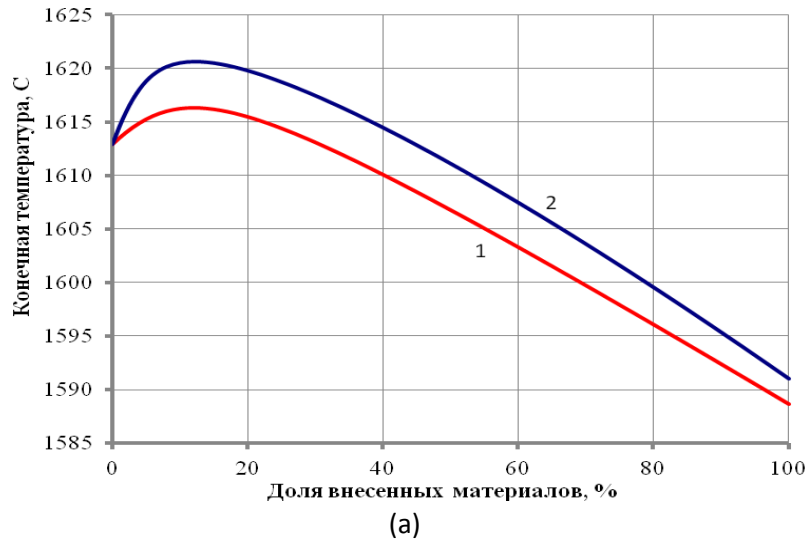
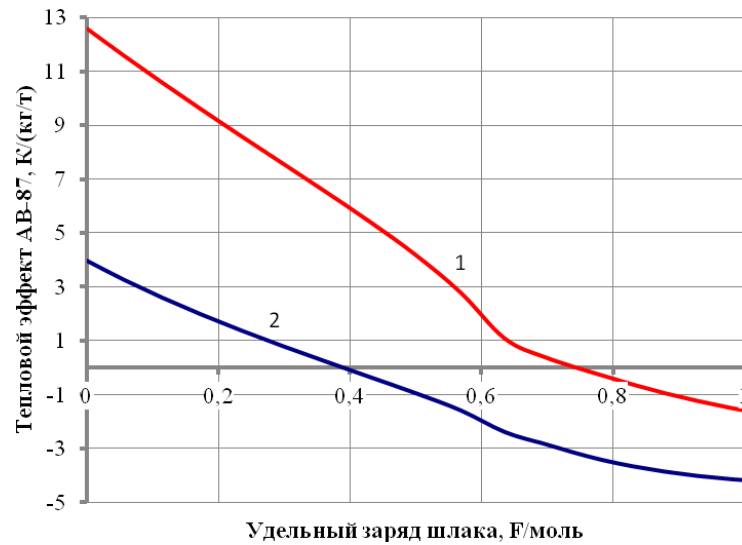
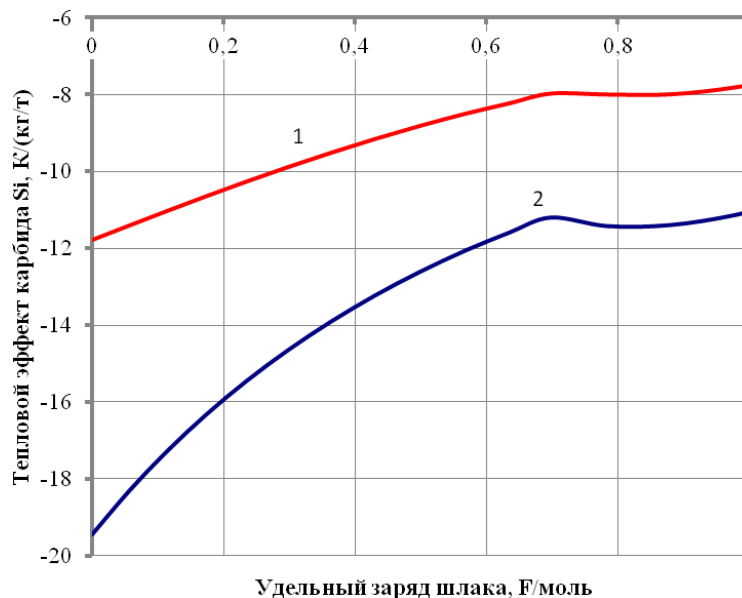


Рисунок 1 – Вплив частки внесених матеріалів (а) і питомого заряду шлаку (б) на температуру розплаву під час обробки сталей марок 09Г2С (1) і 35ХГСА (2) за технологією ВЕЛР

Типовий приклад впливу питомого заряду шлаку на тепловий ефект матеріалу зі значним екзотермічним ефектом – вторинного алюмінію марки АВ-87 – подано на рис. 2,а. Як видно, тепловий ефект цього матеріалу знижується від 12,5 К/(кг/т) для сталі 09Г2С і 3,9 К/(кг/т) для сталі 35ХГСА до області негативних значень під час підвищення питомого заряду шлаку. Це пояснюється відновленням елементів з позитивною валентністю й одночасним зниженням вмісту кисню у сталі під час обробки. В цілому спостерігається більш високий тепловий ефект АВ-87 за обробкою низьковуглецевої сталі 09Г2С, яка спочатку містить більше кисню.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Вплив питомого заряду шлаку на теплові ефекти вторинного алюмінію АВ- 87 (а) і карбіду кремнію (б) під час обробки сталей марок 09Г2С (1) і 35ХГСА (2) за технологією ВЕЛР

На рис. 2,б наведено графік змінювання теплового ефекту карбіду кремнію під час збільшення питомого заряду шлаку  $q$  від 0 до 1 F/моль. Цей матеріал також має екзотермічний ефект за високої окисленості сталі, проте вуглець, що входить до складу карбіду кремнію, значно знижує його. Характер такої залежності пояснюється взаємодією вуглецю з киснем розплаву з утворенням газової фази за  $q < 0,6$  F/моль. При цьому відбувається поглинання теплоти газовою фазою, що супроводжується низькими показниками теплового ефекту. За видалення кисню з підвищенням питомого заряду шлаку тепловий ефект карбіду кремнію помітно підвищується для обох досліджених сталей.

*Висновки.* Встановлено, що теплові ефекти матеріалів під час обробки низьколегованих сталей з використанням технології вторинного електротермічного легування та рафінування істотно залежать як від частки внесених матеріалів, так і від питомого заряду шлаку. На основі термодинамічного аналізу системи «метал-шлак-газ» отримано формули

для розрахунку теплових ефектів матеріалів, у тому числі в процесі ВЕЛР. Розраховано теплові ефекти всіх матеріалів, що використовують для розкислювання-легування сталі, включаючи феросплави, карбід кремнію, вапно та електроенергію. Досліджено особливості змінювання теплових ефектів матеріалів залежно від питомого заряду шлаку за позапічної обробки сталей 09Г2С і 35ХГСА. Показано, що збільшення питомого заряду шлаку знижує тепловий ефект вторинного алюмінію та інших матеріалів з великим екзотермічним ефектом. В той же час відбувається відносно підвищення теплового ефекту вуглецьвмісних матеріалів, таких як карбід кремнію. На прикладі сталей 09Г2С і 35ХГСА показано екстремальну залежність температури розплаву від частки внесених матеріалів.

### Бібліографічний перелік

1. Харченко, А. В., Личконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Вторичное легирование и рафинирование стали в установках печь-ковш. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2012. Вип. 1(26). С. 17-21.
2. Харченко, А. В., Лаптев Д. А., Башлий С. В. Экспериментальные исследования технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2014. Вип. 1(31). С. 30-35.
3. Харченко, А. В., Кириченко А. Г., Белоконь Ю. А. Термодинамика и кинетика процесса вторичного электротермического легирования и рафинирования металла. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2015. Вип. 1(33). С. 9-13.
4. Харченко, А. В., Личконенко Н. В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование металла с участием газовой фазы. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2016. Вип. 1(35), 2016. С. 9-13.
5. Харченко, А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Вторичное электротермическое легирование и рафинирование низколегированной стали. *Метал та лиття України*. 2019. Т. 27. № 10-12. С. 56-63.
6. King, R. J., Chilcott W. R. Chilling Effects of Ferroalloy Additions to Liquid Steel. *Physical Chemistry of Production of Use of Alloy Additives*. АІМЕ : New York. 1974.
7. Харченко, А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 10. С. 131-137.
8. Харченко, А. В., Пономаренко А. Г., Корзун Е. Л. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8 (228). С. 135-139.
9. Харченко, А. В. Теплоёмкость и другие термодинамические функции смешения многокомпонентной конденсированной фазы. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*. 2012. Вип. 2 (27). С. 20-28.
10. Харченко, А. В., Пономаренко А. Г. Термодинамическое моделирование системы металл-шлак-газ с учетом тепла химических реакций. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8. С. 40-43.
11. Харченко, А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса. *Метал та лиття України*. 2005. Т. 13. № 6. С. 13-17.
12. Харченко, А. В., Будакова С. А. Интегрированный расчет материального, энергетического и теплового балансов плавки в системах управления сталеплавильными процессами. Труды Девятого конгресса сталеплавильщиков. Старый Оскол, 17-19.10.2006 г. Москва : Черметинформация, 2007. С. 178-187.
13. Харченко А. В., Синяков Р. В. Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2016. Вип. 2(36). С. 16-22.
14. Харченко А. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Применение метода химических потенциалов Гиббса в черной металлургии. *Металургія : збірник наукових праць ЗДІА*, 2017. Вип. 2(38). С. 20-25.
15. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. Пер. с англ. Москва : Металлургия. 1989. 503 с.

16. Эллиот Д. Ф., Глейзер М. В. Термохимия сталеплавильных процессов. Москва : Metallurgiya, 1969. 252 с.
17. Куликов И. С. Раскисление металлов. Москва : Metallurgiya, 1975. 504 с.

### References

1. Khrchenko A. V., Lichkonenko N. V., Mosejko YU. V. Vtorichnor legirovanie I rafinirovanie stali v ustanovkakh «pech'-kovsh». *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2012. vol. 1(26). pp. 17-21.
2. Khrchenko A. V., Laptev D. A., Bashliy S. V. Eksperimental'nye issledovaniya tekhnologii vtorichnogo elektrotermicheskogo legirovaniya i rafinirivaniya. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2014. vol. 1(31). pp. 30-35.
3. Khrchenko A. V., Kirichenko A. G., Belokon' Yu, A. Termodinamika I kinetika protsessa vtorichnogo elektrotermicheskogo legirovaniya I rafinirovaniya metalla. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2015. vol. 1(33). pp. 9-13.
4. Khrchenko A. V., Lichkonenko N. V. Vtorichnoe elektrotermicheskoe legirovanie I rafinirovanie metalla s uchastiem gazovoy fazy. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, vol. 1(35), 2016. pp. 9-13.
5. Khrchenko A. V., Sinyakov R. V., Lichkonenko N. V. Vtorichnoe elektrotermicheskoe legirovanie I rafinirovanie nizkolegirovannoy stali. *Metal ta lyttya Ukrainy*. 2019. t. 27. no. 10-12. pp. 56-63.
6. King, R. J., Chilcott W. R. Chilling Effects of Ferroalloy Additions to Liquid Steel. *Physical Chemistry of Production of Use of Alloy Additives*. AIME : New York. 1974.
7. Khrchenko A. V., Ponomarenko A. G., Dovgonyuk S. V. Differentsial'nye kooffitsienty usvoeniya v komp'yuternykh sistemakh upravleniya plavkoy i vnepechnoy obrabotkoy stali. *Metallurgicheskya I gornorudnaya promyshlennost'*. 2002. no. 10. pp. 131-137.
8. Khrchenko A. V., Ponomarenko A. G., Korzun E. L. Termodinamicheskaya model' mnogokomponentnoy kondensirovannoy fazy. *Metallurgicheskya I gornorudnaya promyshlennost'*. 2004. no. 8 (228). pp. 135-139.
9. Khrchenko A. V. Teploemkost' I drugie termodinamicheskie funktsii smesheniya mnogokomponentnoy kondensirovannoy fazy. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2012. vol. 2 (27). pp. 20-28.
10. Khrchenko A. V., Ponomarenko A. G. Termodinamicheskoe modelirovanie systemy metall-shlak-gaz s uchetom tepla khimicheskikh reaktsiy. *Metallurgicheskya I gornorudnaya promyshlennost'*. 2004. no. 8. pp. 40-43.
11. Khrchenko A. V. Termodinamicheskoe modelirovanie systemy metall-shlak-gaz s uchetom ental'piynogo tplovogo balansu. *Metal ta lyttya Ukrainy*. 2005. t. 13. no. 6. pp. 13-17.
12. Khrchenko A. V., Budakva S. A. Integrirovannyi raschet material'nogo I teplovogo balansov plavki v sistemakh upravleniya staleplavil'nymi protsessami. *Trudy Devyatogo kongressa staleplavil'shchikov*. Staryy Oskol, 17-19.10.2006 g. Moskva : Chermetinformatsiya, 2007. pp. 178-187.
13. Khrchenko A. V., Sinyakov R. V. Termodinamicheskaya model' mnogokomponentnoy zhidkoy shlakovoy fazy. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2016. vol. 2(36). pp. 16-22.
14. Khrchenko A. V., Sinyakov R. V., Lichkonenko N. V. Primenenie metoda khimicheskikh potentsialov Gibbса v cheroй metallurgii. *Metallurgiya : Zbirnyk naukovykh prats' ZDIA*, 2017. vol. 2(38). pp. 20-25.
15. Lyupis K. Khimicheskaya termodinamika. Per. s angl. Moskva : Metallurgiya. 1989. 503 p.
16. Elliot D. F., Glejzer M. V. Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov. Moskva : Metallurgiya, 1969. 252 p.
17. Kulikov I. S. Raskislenie metallov. Moskva : Metallurgiya, 1975. 504 p.

**Khrchenko Alexander**, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University.

**Lichkonenko Natalia**, senior lecturer, Zaporizhzhia National University.

---

**THERMAL EFFECTS OF SECONDARY ELECTROTHERMAL ALLOYING AND REFINING OF STEEL**

Analysis of the thermal effects of materials and electricity in the out-of-furnace treatment of 09G2S and 35HGSA steels using technology of secondary electrothermal alloying and refining (SEAR) has been carried out. The features of the change in the thermal effects of materials are considered depending on the specific charge of the slag and the portion of added materials. It is shown that, depending on the current state of the "metal-slag-gas" system, the thermal effects of materials can be either positive and negative, which is due to the complex interaction of the elements that make up their composition with liquid steel and slag. Main components of such interaction are listed: absorption of the physical heat of the melt by the material with the ambient temperature; imperfection of a multicomponent metal solution; interaction of elements with oxygen dissolved in liquid metal. It was found that the thermal effects of materials during the processing of low-alloy steels using the SEAR technology significantly depend on both the proportion of the introduced materials and the specific charge of the slag. On the basis of thermodynamic analysis of the "metal-slag-gas" system, formulas for calculating heat effects were obtained. Thermal effects of all materials used for deoxidationalloying, including ferroalloys, silicon carbide, lime, and electricity, have been calculated. It is shown that an increase in the specific charge of the slag reduces the thermal effect of secondary aluminum and other materials with a large exothermic effect. At the same time, there is a relative increase in the heat effect of carbonaceous materials such as silicon carbide. Using steels 09G2S and 35HGSA as an example, an extreme dependence of the melt temperature on the portion of added materials is shown. Generalizing conclusions have been made regarding factors affecting the thermal effects when adding materials into liquid steel.

Стаття надійшла: 05.11.2020 р.