

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по конвертерному производству стали,
её внепечной обработке и разливке
(для студентов по направлению подготовки 22.04.02
«Металлургия», магистерской программы «Металлургия стали»)

Донецк, 2017

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по конвертерному производству стали,
её внепечной обработке и разливке
(для студентов по направлению подготовки 22.04.02
«Металлургия», магистерской программы «Металлургия стали»)

Рассмотрено на заседании
кафедры «Металлургия стали
и сплавов».
Протокол № 9 от 18.01.2017 г.

Донецк, 2017

УДК 669.18.046.5.18:621

Методические указания к решению задач из области конвертерного производства стали, её внепечной обработки и разливки (для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия», магистерской программы «Металлургия стали») / Сост: В.Л. Жук, В.Е. Ухин, И.Н. Салмаш. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2017. – 35 с.

Методические указания содержат примеры задач по отдельным разделам курса «Металлургия стали» и направлены на углубленное понимание студентами качественных и количественных закономерностей, которые происходят в процессах выплавки, внепечной обработки и разливки стали.

Составители:	В.Л. Жук, к.т.н., доц. В.Е. Ухин, к.т.н., доц. И.Н. Салмаш, к.т.н., доц.
Рецензенты:	В.И. Заика, к.т.н., доц. каф. «Металлургия стали и сплавов»; А.В. Кузин, к.т.н., доц. каф. «Руднотермические процессы и малоотходные технологии»
Ответственный за выпуск:	А.А.Троянский, д.т.н., проф.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Практическое занятие 1. Эффективность применения охладителей в кислородно-конвертерной плавке.....	5
Практическое занятие 2. Техничко-экономические параметры кислородно-конвертерной плавки.....	7
Практическое занятие 3. Тепловые характеристики кислородно-конвертерного процесса.....	11
Практическое занятие 4. Шихтовые и окислительные материалы кислородно-конвертерной плавки.....	15
Практическое занятие 5. Технология и способы разлики стали.....	24
Практическое занятие 6. Внепечная обработка стали.....	27
Приложение А. Варианты исходных данных к задачам	31
Список использованных источников	35

ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет уровень экономической мощи того или иного государства определялся в первую очередь количеством выплавленной стали, как основного конструкционного материала – около 90% общего их производства. Общее мировое производство стали в настоящее время превышает 1,5 млрд. т.

Настоящие методические указания содержат примеры расчетов, необходимых для более углубленного понимания студентами качественных и количественных закономерностей, касающихся процессов выплавки, внепечной обработки и разливки стали. Они позволят студентам получить достаточно полное представление о теории и современной практике металлургии стали.

Указания включают 6 практических занятий и 22 задачи, каждая из которых состоит из обобщенных исходных данных и примера её решения. Конкретные исходные данные в 3-х вариантах приводятся в приложении А и задаются преподавателем. Защита выполненных решений осуществляется на следующем за предыдущим занятии после полного их оформления в тетради для практических занятий.

Практическое занятие 1. Эффективность применения охладителей в кислородно-конвертерной плавке.

Цель проведения занятия – ознакомиться с методами охлаждения жидкого металла в кислородно-конвертерной плавке и эффективностью их применения путем проведения расчетов.

Задача 1. Определить охлаждающий эффект железной руды в 130 – тонном кислородном конвертере, если расходы руды составляют 30-90 кг/т расплавленного металла, а содержание Fe_2O_3 в руде 70-90%.

Решение: Приблизительный расчет охлаждающего эффекта руды возможно выполнить по формуле:

$$Q_p = G \cdot [\% Fe_2O_3] \cdot \frac{112}{160} \cdot Q_1, \quad (1)$$

где G – масса руды, кг; $\%Fe_2O_3$ – содержание оксида железа в руде; 112 и 160 – молекулярные массы железа и окиси железа; Q_1 – тепловой эффект образования Fe_2O_3 , равный 7360 кДж/кг.

При расходе руды 30 кг/т ее масса будет составлять: $30 \cdot 130 = 3900$ кг. Охлаждающий эффект руды с содержанием 90% Fe_2O_3 будет составлять:

$$Q_p = 3900 \cdot 0,90 \cdot \frac{112}{160} \cdot 7360 \approx 1,86 \cdot 10^7 \text{ кДж.}$$

Задача 2. Определить охлаждающий эффект металлолома в 250 – тонном кислородном конвертере, если расходы металлолома составляют 30-90 кг/т расплавленного металла, температура плавления металлолома $1500^\circ C$, температура выпуска металла $1620^\circ C$.

Решение: Тепло, затраченное на расплавление металлолома, может быть вычислено по формуле:

$$Q_l = G[C_{cp(T)} \cdot t_{пл} + \lambda + C_{cp(P)} \cdot (t_{ст} - t_{пл})], \quad (2)$$

где G – масса металлолома, кг; $C_{cp(T)}$ – средняя теплоемкость металла до температуры плавления, кДж/(кг·град); $t_{пл}$ и $t_{ст}$ – температуры плавления

металлолома и выпуска стали, °С; λ – скрытая теплота плавления, кДж/кг; $C_{\text{ср(Р)}}$ – средняя теплоемкость жидкой стали, кДж/(кг·град).

При расходе металлолома 40 кг/т его масса будет составлять:
 $40 \cdot 250 = 10000$ кг.

Из справочной литературы находим значение средней теплоемкости и скрытой теплоты плавления стали:

$$C_{\text{ср(Р)}} = 0,84 \text{ кДж/(кг·град)}; \lambda = 272 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом:

$$\begin{aligned} Q_{\text{л}} &= 10000 \cdot [0,7 \cdot 1500 + 272 + 0,84 \cdot (1620 - 1500)] \\ &= 10000 \cdot (1050 + 272 + 100,8) \\ &= 10000 \cdot 1422,8 \approx 1,42 \cdot 10^7 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Задача 3. По данным расчетов, полученными в задачах 1 и 2, сравнить охлаждающие эффекты железной руды и металлолома при одинаковых их расходах.

Решение: Для расплавления 1 кг металлолома по данным задачи 2 нужно потратить $1,42 \cdot 10^7 / 10000 = 1,42 \cdot 10^3$ кДж тепла, а для разложения 1 кг железной руды (данные задачи 1) нужно потратить тепла в количестве $1,86 \cdot 10^7 / 3900 = 4,756 \cdot 10^3$ кДж.

Таким образом, соотношение охлаждающих эффектов железной руды и металлолома составляет $4756 / 1420 = 3,35$.

Практическое занятие 2. Техничко-технологические параметры кислородно-конвертерной плавки.

Цель проведения занятия – ознакомиться с технологическими и техническими характеристиками конвертерной плавки при продувке металла кислородом сверху и выполнять простейшие расчеты по выбору необходимых характеристик.

Задача 4. Определить – удельный расход технического кислорода на 1 тонну шихты конвертерной плавки, если общая потребность кислорода на окисление примесей 1 тонны шихты составляет 68-72 кг, а степень усвоения кислорода равняется 0,95-0,98.

Решение: Удельный расход кислорода вычисляется по формуле:

$$M = \frac{100 \cdot O_1}{\{O_2\} \cdot K}, \text{ кг/т}, \quad (3)$$

где 100 – полное усвоение кислорода, %; O_1 – общая потребность кислорода, кг/т; $\{O_2\}$ – содержание кислорода в техническом кислороде, % (не менее 99,5%); K – степень усвоения кислорода, доли единицы.

В этой задаче: $O_1 = 70$ кг/т; $\{O_2\} = 99,5\%$; $K = 0,96$, доли единицы.

Тогда:

$$M = \frac{100 \cdot 70}{99,5 \cdot 0,96} = 73,3 \text{ кг/т или } M = 73,3 \cdot \frac{22,4}{32} = 51,3 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Задача 5. Определить температуру стали после продувки кислородом в 130-350 – тонном кислородном конвертере, если доля тепла, которая вносится жидким чугуном, в общем приходе составляет 50-55%, доля теплоемкости стали в общих расходах – 72-75%, расход металлолома – 20-25%, выход стали – 89-93%.

Решение. Температуру стали после продувки можно определить по формуле:

$$q_{y\partial} = C_{cm(T)} \cdot t_{nl} + \lambda + C_{cp(P)}(t_{cm} - t_{nl}), \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

где $q_{уд}$ – удельная теплоемкость 1 кг жидкой стали, кДж/кг; $t_{пл}$, λ , $C_{ст(Т)}$, $C_{ср(Р)}$, $t_{ст}$ – указаны в задаче 2.

В зависимости от химического состава металлолома, температуру его плавления $t_{пл}$ можно принять в пределах 1480-1500°C, значение средней теплоемкости $C_{ср(Т)}$ и $C_{ср(Р)}$, и скрытой теплоты плавления λ , соответственно: 0,7 и 0,8 кДж/(кг·К), и 272 кДж/кг.

Из формулы (4) имеем:

$$t_{ст} = \frac{q_{уд} - C_{ср(Т)} \cdot t_{пл} - \lambda + C_{ср(Р)} \cdot t_{пл}}{C_{ср(Р)}}.$$

Для вычисления $q_{уд}$ необходимо определить приход тепла, вносимого жидким чугуном, а также долю теплоемкости стали в расходной части теплового баланса плавки. Для данной задачи принимаем: вместимость конвертера – 250 т; доля тепла, которая вносится жидким чугуном в общий приход – 50%; доля теплоемкости стали в расходной части – 73%; расход металлолома – 22%; выход стали – 92%; температура плавления стали – 1500°C.

Тогда, приход тепла, вносимого жидким чугуном, будет составлять:

$$Q_{прих} = \frac{(250 \cdot 0,78 \cdot 1197 \cdot 10^3)}{0,5} = 466,83 \cdot 10^6 \text{ кДж},$$

где 1197 – теплоемкость 1 кг чугуна, кДж/кг; 0,78 – доля чугуна в шихте, доли единицы.

Теплоемкость стали составит:

$$466,83 \cdot 10^6 \cdot 0,73 = 340,8 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

Масса стали в одной плавке составит:

$$250 \cdot 0,92 = 230 \text{ т}.$$

Удельное теплосодержание 1 кг жидкой стали составит:

$$Q_{yd} = \frac{340,8 \cdot 10^6}{230 \cdot 10^3} = 1482 \text{ кДж/кг.}$$

Температура стали после продувки кислородом будет составлять:

$$t_{cm} = \frac{(1482 - 0,7 \cdot 1500 - 272 + 0,84 \cdot 1500)}{0,84} \approx 1690 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Задача 6. Определить выход жидкой стали в кислородном конвертере для условий: на 1 т шихты расходуется 730-760 кг чугуна, 240-270 кг металлолома; масса удаленных примесей со шлаком при окислении Si, Mn, C и P, составляет 42-48 кг; потери железа, которое переходит в шлак в виде оксидов, составляют 29-31 кг; масса железа, которое теряется с корольками шлака, плавильной пылью, выбросами и выносом, соответственно, составляет: 3,8-4,4; 7,2-7,3 и 18-22 кг; загрязнения металлолома и окалины составляют 7,5-8,0 кг; восстановится железа из окалины металлолома 1,8-2,0 кг.

Решение: Выход жидкой стали можно вычислить по формуле:

$$M_{\text{ж.ст.}} = M_1 + M_2 - M_3 - M_4 - M_5 - M_6 - M_7 - M_8 + M_9, \text{ кг,} \quad (5)$$

где M_1 , M_2 – соответственно, расходы чугуна и металлолома; M_3 – масса удаленных примесей со шлаком при окислении Si, Mn, C и P; M_4 – потери железа, которое переходит в шлак в виде оксидов; M_5 , M_6 и M_7 – соответственно, масса железа, которое теряется с корольками шлака, плавильной пылью, выбросами и выносом; M_8 – масса загрязнения металлолома и окалины; M_9 – масса восстановленного железа из окалины металлолома.

В данной задаче принимаем: $M_1 = 740$ кг; $M_2 = 260$ кг; $M_3 = 47$ кг; $M_4 = 30$ кг; $M_5 = 4,2$ кг; $M_6 = 7,25$ кг; $M_7 = 20$ кг; $M_8 = 7,8$ кг; $M_9 = 1,88$ кг.

Тогда выход жидкой стали будет составлять:

$$M_{\text{ж.ст.}} = 740 + 260 - 47 - 30 - 4,2 - 7,25 - 20 - 7,8 + 1,88 = 885,63 \text{ кг или } 88,56\%.$$

Задача 7. Определить годовое производство 130-350 – тонного кислородного конвертера, если длительность плавки составляет 42-54 минуты, простои – 8-12%, выход жидкой стали – 88-94%.

Решение: Годовое производство определяется по формуле:

$$P_{год} = G_{конв} \cdot \frac{24 \cdot (1 - П) \cdot 365 \cdot P}{\tau_{пл}}, \text{ т}, \quad (6)$$

где $G_{конв}$ – вместимость конвертера, т; 24 – количество часов в сутках; П – простои конвертера, доли единицы; 365 – количество дней в календарном году; P – выход жидкой стали, доли единицы; $\tau_{пл}$ – длительность плавки, часов.

Принимаем $G_{конв} = 150$ т, $\tau_{пл} = 45$ мин., П = 10%; P = 90%.

Тогда:

$$P_{год} = \frac{150 \cdot 24 \cdot (1 - 0,1) \cdot 365 \cdot 0,9}{0,75} = 1419000 \text{ т.}$$

Практическое занятие 3. Тепловые характеристики кислородно-конвертерного процесса.

Цель проведения занятия – ознакомиться с источниками тепла, обеспечивающего нагрев металла кислородно-конвертерной плавки и выполнять простейшие расчеты по определению тепла, выделяющегося при окислении примесей расплавленного металла.

Задача 8. Определить приход физического тепла чугуна, нагретого до температуры 1250-1400°C, если на 1 т шихты кислородно-конвертерной плавки тратится 730-760 кг чугуна.

Решение: Физическое тепло чугуна можно вычислить по формуле:

$$H_q = [C_1 \cdot t_{пл} + \lambda + C_2 \cdot \Delta t] \cdot M_1, \text{ Дж}, \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – теплоемкость твердого и жидкого чугуна соответственно, кДж/(кг град); $t_{пл}$ – температура плавления чугуна, °C; λ – скрытая теплота плавления чугуна, кДж/кг; Δt – перегрев чугуна над температурой плавления, °C; M_1 – расход чугуна, кг.

Для проведения расчетов из справочной литературы принимаем: C_1 и C_2 соответственно: 0,746 и 0,838 кДж/(кг град); $\lambda = 218$ кДж/кг; $t_{пл} = 1200^\circ\text{C}$.

В данной задаче температуру нагрева чугуна установим равной 1320°C, а его расход – 740 кг.

Тогда:

$$H_q = [0,746 \cdot 1200 + 218 + 0,838 \cdot (1320 - 1200)] \cdot 740 \cdot 10^{-3} = 898,2 \text{ МДж}.$$

Задача 9. Определить тепло от экзотермических реакций окисления примесей расплавленного металла в кислородном конвертере, если за период продувки металла кислородом окислится: углерода – 2,8-3,8%, кремния – 0,5-0,9%, марганца – 0,4-0,8%, фосфора – 0,08-0,15%; расходы чугуна и металлолома на 1 т шихты, соответственно, составляют: 730-760 и 240-270 кг.

Решение: Тепло химических реакций окисления какого-либо элемента можно вычислить по формуле:

$$H_{\text{экз}}^i = \Delta H_i \cdot \Delta[m_i], \text{ кДж}, \quad (8)$$

где ΔH_i – тепловой эффект реакции окисления i -го элемента, кДж/кг; $\Delta[m_i]$ – масса элемента, который окислится, кг.

Углерод может окисляться до СО и до СО₂. В среднем доля углерода, который окислится до СО₂, составляет 0,1, а до СО – 0,9 доли единицы.

В данной задаче принимаем такое количество элементов, которые окисляются: углерод – 3,4%; кремний – 0,7%; марганец – 0,5%; фосфор – 0,1%. Расходы чугуна и металлолома, соответственно: 740 и 260 кг.

Тепло от окисления углерода вычислим по формуле:

$$H_{\text{экз}}^{[C]} = \frac{M_1 + M_2}{100 \cdot [\Delta H_{\text{CO}} \cdot (1 - \eta) \cdot \Delta[c] + \Delta H_{\text{CO}_2} \cdot \eta \cdot \Delta[c]]}, \text{ МДж}, \quad (9)$$

где M_1 и M_2 – соответственно расходы чугуна и металлолома, кг; ΔH_{CO} и ΔH_{CO_2} – соответственно, тепловые эффекты реакций окисления углерода до СО и до СО₂ ($\Delta H_{\text{CO}} = 10,47$ и $\Delta H_{\text{CO}_2} = 34,09$ МДж/кг); η – доля углерода, который окислится до СО₂.

Тогда:

$$H_{\text{экз}}^{[C]} = \frac{740 + 260}{100 \cdot [10,47 \cdot (1 - 0,1) \cdot 3,4 + 34,09 \cdot 0,1 \cdot 3,4]} = 436,3 \text{ МДж}.$$

Тепло от окисления кремния вычислим по формуле:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[Si]} = \Delta H_{(\text{SiO}_2)} \cdot (M_1 + M_2) / 100 \cdot \Delta[Si], \text{ МДж}, \quad (10)$$

где ΔH_{SiO_2} – тепловой эффект реакции окисления кремния до SiO₂, который составляет 31,1 МДж/кг.

Тогда:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[Si]} = 31,1 \cdot (740 + 260) / 100 \cdot 0,7 = 217,7 \text{ МДж.}$$

Тепло от окисления марганца вычислим по формуле:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[Mn]} = \Delta H_{MnO} \cdot (M_1 + M_2) / 100 \cdot \Delta[Mn], \text{ МДж,} \quad (11)$$

где ΔH_{MnO} – тепловой эффект реакции окисления марганца до MnO, который составляет 7,36 МДж/кг.

Тогда:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[Mn]} = 7,36 \cdot (740 + 260) / 100 \cdot 0,5 = 36,8 \text{ МДж.}$$

Тепло от окисления фосфора вычислим по формуле:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[P]} = \Delta H_{P_2O_5} \cdot (M_1 + M_2) / 100 \cdot \Delta[P], \quad (12)$$

где $\Delta H_{P_2O_5}$ – тепловой эффект реакции окисления фосфора до P_2O_5 , который составляет 25 МДж/кг.

Тогда:

$$H_{\text{экз}}^{[P]} = 25 \cdot (740 + 260) / 100 \cdot 0,1 = 25 \text{ МДж.}$$

Задача 10. Определить тепло, которое выделится, от окисления железа в кислородном конвертере до оксидов, которые перейдут в шлак, и с плавильной пылью. Количество шлака, который образуется за период продувки расплава кислородом, составляет 120-160 кг на 1 т шихты. Состав шлака: FeO = 20-25%; Fe₂O₃ = 4-8%. Количество плавильной пыли – 0,8-1,2%, содержание Fe₃O₄ в плавильной пыли – 98-100%.

Решение: Тепло, что выделится от окисления железа до FeO и Fe₂O₃, которые перейдут в шлак, можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{экз}}^{[Fe]} &= \Delta H_{FeO} \cdot \frac{M_3}{100} \cdot 0,78 \cdot (FeO) + \\ &+ \Delta H_{Fe_2O_3} \cdot \frac{M_3}{100} \cdot 0,7 \cdot (Fe_2O_3), \text{ МДж,} \end{aligned} \quad (13)$$

где ΔH_{FeO} и $\Delta H_{Fe_2O_3}$ – тепловые эффекты реакций окисления железа до FeO и Fe₂O₃, которые составляют соответственно 4,82 и 7,37 МДж; M₃ – количество шлака, который образуется при окислении примесей, кг; 0,78 и 0,7 – соответственно доли единицы железа в FeO и Fe₂O₃. В данной задаче принимаем: M₃ = 140 кг, (FeO) = 23%, (Fe₂O₃) = 5%.

Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{экз}}^{[Fe]} &= 4,82 \cdot 140 / 100 \cdot 0,78 \cdot 23 + \\ &+ 7,37 \cdot 140 / 100 \cdot 0,7 \cdot 5 = 156,8 \text{ МДж.} \end{aligned}$$

Тепло, что выделится от окисления железа до Fe₃O₄ и потеряется с плавильной пылью, можно определить по формуле:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[nn]} = \Delta H_{Fe_3O_4} \cdot \frac{M_4}{100} \cdot 0,724 \cdot (Fe_3O_4), \text{ МДж,} \quad (14)$$

где $\Delta H_{Fe_3O_4}$ – тепловой эффект окисления железа до Fe₃O₄, который составляет 6,52 МДж/кг; M₄ – количество плавильной пыли, которая образуется при окислении железа до Fe₃O₄, %; 0,724 – доля единицы железа в виде Fe₃O₄. В данной задаче принимаем M₄ = 1%; (Fe₃O₄) = 100%.

Тогда:

$$\Delta H_{\text{экз}}^{[nn]} = 6,52 \cdot \frac{1}{100} \cdot 0,724 \cdot 100 = 47,2 \text{ МДж.}$$

Практическое занятие 4. Шихтовые и окислительные материалы кислородно-конвертерной плавки.

Цель проведения занятия – ознакомиться с металлическими, шлакообразующими и окислительными материалами кислородно-конвертерной плавки и выполнять простейшие расчеты по определению количества образующихся побочных продуктов.

Задача 11. Определить расход извести на 1 т шихты для получения основности шлака в конце продувки кислородно-конвертерной плавки $B = (\text{CaO}/\text{SiO}_2) = 3,2-3,7$ для условий: расход чугуна – 730-760 кг; расход металлолома – 240-270 кг; содержание кремния в металлоломе – 0,1-0,3%, а в чугуне – 0,2-1,2%; содержание SiO_2 в засоренности металлолома – 60-80%, в футеровке – 2-4%, а в извести – 1-3%, засоренность металлолома – 0,5-3,2%; количество футеровки, что переходит в шлак – 2-4 кг; содержание CaO в извести – 96-98%, а в футеровке – 55-60%.

Решение: Известь вводится в шихту конвертерной плавки с целью получения шлака необходимой основности B , которую можно вычислить по формуле:

$$B = \frac{D_3 + D_4}{K_{1,2} + K_2 + K_3 + K_4}, \quad (15)$$

где D_3 и D_4 – количество поступлений оксида кальция в шлак соответственно из извести и материала футеровки, кг; $K_{1,2}$, K_2 , K_3 , K_4 – количество поступлений оксида кремния в шлак, соответственно, из шихты, засоренности металлолома, извести материала футеровки конвертера, кг.

В задаче принимаем: основность шлака $B = 3,5$; расходы чугуна и металлолома соответственно 740 и 260 кг; содержание кремния в металлоломе и чугуне соответственно 0,2 и 1,2%; содержание SiO_2 в засоренности металлолома, футеровки и извести соответственно 75; 3 и 2%; засоренность металлолома – 2%; количество футеровки, что переходит в шлак – 3 кг; содержание CaO в извести и футеровке соответственно 97 и 58%.

Поступит кремнезема из шихты за счет окисления кремния:

$$\begin{aligned} K_{1,2} &= \frac{M_1 \cdot [Si]_1}{100} \cdot \frac{60}{28} + \frac{M_2 \cdot [Si]_2}{100} \cdot \frac{60}{28} = \\ &= \frac{2,14}{100} \cdot (M_1 \cdot [Si]_1 + M_2 \cdot [Si]_2), \text{ кг}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $[Si]_1$ и $[Si]_2$ – содержание кремния в чугуна и металлоломе, %.

Тогда:

$$K_{1,2} = \frac{2,14}{100} \cdot (740 \cdot 1,2 + 260 \cdot 0,2) = 20,116 \text{ кг.}$$

Количество кремнезема в засоренности металлолома определим из формулы:

$$K_2 = \frac{m \cdot M_2}{10^4} \cdot (SiO_2)_2, \text{ кг}, \quad (17)$$

где m – засоренность металлолома, %; $(SiO_2)_2$ – содержание оксида кремния в засоренности металлолома %.

Тогда:

$$K_2 = \frac{2 \cdot 260}{10^4} \cdot 75 = 3,9 \text{ кг.}$$

Количество кремнезема материала футеровки определим из формулы:

$$K_4 = \frac{M_4}{100} \cdot (SiO_2)_4, \text{ кг}, \quad (18)$$

где $(SiO_2)_4$ – содержание оксида кремния в материале футеровки, %; M_4 – количество футеровки, что переходит в шлак, кг.

Тогда:

$$K_4 = \frac{3}{100} \cdot 3 = 0,09 \text{ кг.}$$

Кремнезем, который содержится в извести, определим из формулы:

$$K_3 = \frac{M_3}{100} \cdot (SiO_2)_3, \text{ кг}, \quad (19)$$

где M_3 – расход извести, кг; $(SiO_2)_3$ – содержание оксида кремния в извести, %.

Тогда:

$$K_3 = \frac{M_3}{100} \cdot 2 = 0,02 \cdot M_3 \text{ кг}.$$

Поступление оксида кальция из материала футеровки определим из формулы:

$$D_4 = \frac{M_4}{100} \cdot (CaO)_4, \text{ кг}, \quad (20)$$

где M_4 – количество футеровки, перешедшей в шлак, кг; $(CaO)_4$ – содержание оксида кальция в футеровке, %.

Тогда:

$$D_4 = \frac{3}{100} \cdot 58 = 1,74 \text{ кг}.$$

Поступление оксида кальция из извести определим из формулы:

$$D_3 = \frac{M_3}{100} \cdot (CaO)_3, \text{ кг}, \quad (21)$$

где $(CaO)_3$ – содержание оксида кальция в извести %; M_3 – расход извести, кг.

Тогда:

$$D_3 = \frac{M_3}{100} \cdot 97 = 0,97 \cdot M_3 \text{ кг}.$$

Из формулы (15) имеем:

$$3,5 = \frac{0,97 \cdot M_3 + 1,74}{20,116 + 3,9 + 0,02 \cdot M_3 + 0,09},$$

$$3,5 \cdot (24,025 + 0,02 \cdot M_3) = 0,97 \cdot M_3 + 1,74,$$

$$0,9 \cdot M_3 = 82,34,$$

откуда, расход извести составит:

$$M_3 = \frac{82,34}{0,9} = 91,5 \text{ кг.}$$

Задача 12. Определить количество шлака, который образуется за период продувки ванны в кислородном конвертере для условий: расход чугуна на 1 т шихты – 730-760 кг; расход металлолома – 240-270 кг; окислится за период продувки: марганца 0,5-0,7%, фосфора 0,08-0,12%, кремния – 0,2-0,4%, расход извести на 1 т шихты – 80-100 кг, содержание в извести оксидов кальция (CaO), кремния (SiO₂), алюминия (Al₂O₃), магния (MgO), фосфора – соответственно 92-96%, 1-3%, 0,8-1,2%, 0,5-0,7% и 0,05-0,15%, содержание SiO₂ и Al₂O₃ в засоренности металлолома – 60-80% и 20-40% соответственно, количество засоренности металлолома – 0,5-2,5%, содержание оксидов железа (FeO) и (Fe₂O₃) в шлаке – 20-25% и 2-6% соответственно, количество футеровки, что переходит в шлак – 2-4 кг; содержание в футеровке оксидов кремния (SiO₂), алюминия (Al₂O₃), магния (MgO) и кальция (CaO) – соответственно 2-4%, 1,5-2,5%, 33-41% и 54-62%.

Решение: Количество шлака, который образуется за период продувки ванны в кислородном конвертере, можно определить по формуле:

$$M_{\text{ш}} = Ш_{1,2} + Ш_2 + Ш_3 + Ш_4 + Ш_5, \text{ кг}, \quad (22)$$

где Ш_{1,2}, Ш₂, Ш₃, Ш₄, Ш₅ – количество шлака, соответственно, от окисления шлакообразующих компонентов шихты (чугуна и металлолома), от внесения из засоренности металлолома, из извести, из материала футеровки и оксидов железа шлака. Продукты окисления шихты внесут:

$$Ш_{1,2} = \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (2,14 \cdot \Delta[Si] + 2,29 \cdot \Delta[P] + 1,29 \cdot \Delta[Mn]), \text{ кг}, \quad (23)$$

где M_1 и M_2 – соответственно, расходы чугуна и металлолома на 1 т стали, кг; 2,14; 2,29 и 1,29 – соответственно, соотношение молекулярных масс оксидов кремния, фосфора и марганца, к атомным или молекулярным массам образующихся элементов; $\Delta[Si]$, $\Delta[P]$ и $\Delta[Mn]$ – количество окислившихся за период продувки, соответственно, кремния, фосфора и марганца, %. Принимаем: $\Delta[Si] = 0,3\%$, $\Delta[P] = 0,1\%$ и $\Delta[Mn] = 0,6\%$; $M_1 = 740$ кг; $M_2 = 260$ кг.

Тогда:

$$Ш_{1,2} = \frac{1000}{100} \cdot (2,14 \cdot 0,3 + 2,29 \cdot 0,1 + 1,29 \cdot 0,6) = 16,45 \text{ кг}.$$

Засоренности металлолома внесут в шлак:

$$Ш_2 = \frac{m \cdot M_2}{10^4} \cdot [(SiO_2) + (Al_2O_3)], \quad (24)$$

где m – количество засоренности металлолома, %; (SiO_2) и (Al_2O_3) – содержание оксида кремния и алюминия в засоренности металлолома, %. Принимаем: $m = 2\%$; $(SiO_2) = 75\%$; $(Al_2O_3) = 25\%$.

Тогда:

$$Ш_2 = \frac{2 \cdot 260}{10^4} \cdot (75 + 25) = 5,2 \text{ кг}.$$

Известь внесет в шлак:

$$Ш_3 = \frac{M_3}{100} \cdot [(CaO) + (SiO_2) + (Al_2O_3) + (MgO) + (P_2O_5)], \text{ кг}, \quad (25)$$

где M_3 – расход извести на 1 т шихты, кг; (CaO) , (SiO_2) , (Al_2O_3) , (MgO) и (P_2O_5) – содержание в извести оксидов кальция, кремния, магния и фосфора, соответственно, %.

Принимаем: (CaO) = 96%; (SiO₂) = 2%; (Al₂O₃) = 1%; (MgO) = 0,6% и (P₂O₃) = 0,1%; M₃ = 90 кг.

Тогда:

$$Ш_3 = \frac{90}{100} \cdot (96 + 2 + 1 + 0,6 + 0,1) = 89,73 \text{ кг.}$$

Материал футеровки внесет в шлак:

$$Ш_4 = \frac{M_4}{100} \cdot [(SiO_2) + (Al_2O_3) + (MgO) + (CaO)], \text{ кг,} \quad (26)$$

где M₄ – количество футеровки, переходящей в шлак, кг; (SiO₂), (Al₂O₃), (MgO) и (CaO) – содержание в футеровке оксидов кремния, алюминия, магния и кальция, соответственно, %.

Принимаем: (MgO) = 37%; (CaO) = 58%; (SiO₂) = 3%; (Al₂O₃) = 2%; M₄ = 3 кг.

Тогда:

$$Ш_4 = \frac{3}{100} \cdot (3 + 2 + 37 + 58) = 30 \text{ кг.}$$

Количество шлака из оксидов железа определим по формуле:

$$Ш_5 = \frac{M_{ш}}{100} \cdot [(FeO) + (Fe_2O_3)], \text{ кг,} \quad (27)$$

где M_ш – количество шлака, который образуется за период продувки, кг; (FeO) и (Fe₂O₃) – содержание оксидов железа в шлаке, %. Принимаем: (FeO) = 21%; (Fe₂O₃) = 4%.

Тогда:

$$Ш_5 = \frac{M_{ш}}{100} \cdot (21 + 4) = 0,25 \cdot M_{ш} \text{ кг.}$$

Общее количество шлака будет составлять:

$$M_{\text{ш}} = 16,45 + 5,2 + 89,73 + 3 + 0,25 \cdot M_{\text{ш}},$$

или:

$$0,75 \cdot M_{\text{ш}} = 104,38,$$

откуда:

$$M_{\text{ш}} = (104,38 / 0,75) = 139,2 \text{ кг.}$$

Задача 13. Определить количество газов, которые образуются в кислородном конвертере в процессе продувки ванны для условий: расход чугуна на 1 т шихты – 730-760 кг; расход металлолома – 240-270 кг; окислится углерода за период продувки – 3,2-3,4%; расход извести на 1 т шихты – 80-100 кг; содержание CO_2 и H_2O в извести – 3,0-9,0 и 0,4-1,2% соответственно; расход технического кислорода – 48-52 $\text{м}^3/\text{т}$.

Решение: В процессе продувки ванны в кислородном конвертере образуются газы: за счет окисления углерода шихты (Γ_1); за счет разложения недожога извести (Γ_2); за счет азота и неусвоенного кислорода из технического кислорода (Γ_3). Общее количество газов (M_{Γ}) будет составлять:

$$M_{\Gamma} = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3, \text{ м}^3. \quad (28)$$

В данной задаче принимаем: расход чугуна на 1 т шихты $M_1 = 740$ кг, металлолома $M_2 = 260$ кг; окислится углерода $\Delta[\text{C}] = 3,2\%$; расход извести на 1 т шихты $M_3 = 90$ кг; содержание $\{\text{CO}_2\}$ и $\{\text{H}_2\text{O}\}$ в извести соответственно 5 и 1%; расход технического кислорода – 50 $\text{м}^3/\text{т}$ расплавленного металла.

За счет окисления углерода шихты образуется:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= 2,33 \cdot \Delta[\text{C}] \cdot \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (1 - \eta) + 3,67 \cdot \Delta[\text{C}] \cdot \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \eta = \\ &= \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \Delta[\text{C}] \cdot [2,33 \cdot (1 - \eta) + 3,67 \cdot \eta] = \\ &= \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \Delta[\text{C}] \cdot (2,33 + 1,34 \cdot \eta), \text{ кг,} \end{aligned} \quad (29)$$

где η – доля углерода, который окислится до углекислоты (находится в пределах 0,10-0,15, принимаем $\eta = 0,10$), доли единицы; 2,33 и 3,67 – соответственно соотношение молекулярных масс CO и CO₂ к атомной массе углерода.

Тогда:

$$G_1 = \frac{1000}{100} \cdot 3,2 \cdot (2,33 + 1,34 \cdot 0,10) \approx 78,85 \text{ кг},$$

или:

$$G_1 = 78,85 \cdot \frac{22,4}{32} = 55,2 \text{ м}^3.$$

За счет разложения недожога извести образуется:

$$G_2 = \frac{M_3}{100} \cdot (\{CO_2\} + \{H_2O\}), \text{ кг}. \quad (30)$$

Тогда, согласно (30) имеем:

$$G_2 = \frac{90}{100} \cdot (5 + 1) = 5,4 \text{ кг или } G_2 = 5,4 \cdot \frac{22,4}{32} = 3,78 \text{ м}^3.$$

За счет азота и неусвоенного кислорода из технического кислорода образуется:

$$G_3 = \frac{M_4}{100} \cdot (1 - K) \cdot \{O_2\} + \frac{M_4}{100} \cdot \{N_2\}, \text{ м}^3. \quad (31)$$

где M_4 – расход технического кислорода для продувки на 1 т расплавленного металла, м³; K – коэффициент усвоения кислорода (как правило, находится в пределах 0,94-0,97, принимаем $K = 0,96$), доли единицы; $\{O_2\}$ и $\{N_2\}$ – содержание кислорода и азота в техническом кислороде, соответственно, %.

Тогда:

$$G_3 = \frac{50}{100} \cdot (1 - 0,96) \cdot 99,5 + \frac{50}{100} \cdot 0,1 = 1,99 + 0,05 = 2,04 \text{ м}^3.$$

Общее количество газов на 1 т расплавленного металла будет составлять:

$$M_G = 55,2 + 3,78 + 2,04 = 61,02 \text{ м}^3.$$

Практическое занятие 5. Технология и способы разливки стали.

Цель проведения занятия – ознакомиться со способами разливки стали, особенностями ее технологии, а также выполнять простейшие расчеты по определению скоростей разливки, выхода годных заготовок и других параметров.

Задача 14. Вычислить массу слитка из стали марки 09Г2 для получения 4-8 заготовок размерами $(0,20-0,30) \times (0,20-0,30) \times (2,6-3,0)$ м, если потери металла с головной обрезью составляют 13,0-14,0%, а с донной – 1,0-2,0%. Угар примесей при разливке – 2-3%.

Решение: Масса слитка вычисляется по формуле:

$$M = n \cdot a \cdot b \cdot l \cdot \rho / (1 - K_G - K_D - K_Y), \text{ т}, \quad (32)$$

где n – количество заготовок; a, b, l – размеры заготовок, м; ρ – плотность металла, т/м³; K_G, K_D, K_Y – расходы металла на головную и донную обрезь и угар, доли единицы.

Принимая в данной задаче: $K_G = 13,5\%$; $K_D = 1,5\%$; $K_Y = 2,0\%$, $a = 0,2$ м, $b = 0,2$ м, $l = 3$ м, $\rho = 7,8$ т/м³, масса слитка для получения 6 заготовок будет равняться:

$$M = 6 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \cdot 3,0 \cdot 7,8 / (1 - 0,135 - 0,015 - 0,020) \approx 6,3 \text{ т.}$$

Задача 15. Определить массовый расход металла из промежуточного ковша, оборудованного стопором и разливочным стаканом диаметром 50-60 мм при высоте металла, равном 0,7-0,9 м и шлака – 0,1-0,15 мм.

Решение: Массовый расход металла можно определить по формуле:

$$M_p = 15 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho_{ж} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_M + 0,5 \cdot h_{ш})}, \text{ т/мин}, \quad (33)$$

где π – число «Пи»; d – диаметр разливочного стакана, м; $\rho_{ж}$ – плотность жидкой стали т/м³; μ – коэффициент расхода металла (допускается рав-

ным 0,8, при наличии стопора), доли единицы; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; H_M , $h_{\text{ш}}$ – высота металла и шлака в ковше, м.

Принимая в данной задаче: $d = 60$ мм, $\rho_{\text{ж}} = 7,0$ т/м³, $H_M = 0,8$ м, $h_{\text{ш}} = 0,1$ м, величина M_p будет составлять:

$$M_p = 15 \cdot 3,14 \cdot (0,06)^2 \cdot 7,0 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (0,8 + 0,5 \cdot 0,1)} = 3,878 \text{ т/мин.}$$

Задача 16 Определить допустимую скорость разливки низколегированной стали на вертикальной МНЛЗ при толщине разливаемого сляба 150-250 мм и длине его к тянущей клетки 18-22 м, коэффициент затвердевания стали – 28-30 мм/мин.

Решение: При разливке на вертикальной МНЛЗ глубина жидкой лунки L непрерывнолитого сляба, который затвердевает с каждой стороны на 0,5 его толщины, достигнет через время τ , которое вычисляется по формуле:

$$\delta = K \cdot \sqrt{\tau} \quad , \quad (34)$$

где δ – толщина затвердевшей части сляба, мм; K – коэффициент затвердевания, мм/мин; τ – время затвердевания сляба на всю толщину, мин.

Принимая, что толщина сляба равняется 250 мм, коэффициент затвердевания $K = 29$ мм/мин, величина τ будет составлять:

$$\tau = \frac{\delta^2}{K^2} = \frac{125^2}{29^2} \approx 18,6 \text{ мин.}$$

Приняв, что глубина жидкой лунки $L = 20$ м, допустимую скорость разливки стали V вычислим по формуле:

$$V = \frac{L}{\tau} \quad , \quad (35)$$

откуда:

$$V = \frac{20}{18,6} \approx 1,1 \text{ м/мин.}$$

Задача 17. Определить необходимую высоту заполнения промежуточного ковша, оборудованного шибером, при расходе металла 1,5-2,5 т/мин через стакан с отверстием канала диаметром 40-50 мм.

Решение: В данной задаче принимаем: расход металла $M_p = 2$ т/мин, диаметр отверстия канала $d = 45$ мм; коэффициент расхода металла μ при разливке через шиберный затвор – 0,7 долей единицы.

Из формулы (33) имеем:

$$H = \frac{M_p^2}{2 \cdot g \cdot (15 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho_{жс} \cdot \mu)^2} =$$

$$= \frac{2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (15 \cdot 3,14 \cdot 0,045^2 \cdot 7,0 \cdot 0,7)^2} = 0,93 \text{ м.}$$

Задача 18. Определить необходимый расход металла на один кристаллизатор, размеры поперечного сечения полости которого составляют (150-250)×(1000-1200) мм, при скорости разливки 0,7-0,9 м/мин.

Решение: Массовый расход металла вычисляют по формуле:

$$M_p = a \cdot b \cdot V \cdot \rho_{жс} \text{ т/мин,} \quad (36)$$

где a, b – размеры поперечного сечения полости кристаллизатора, мм; V – скорость разливки, м/мин; $\rho_{жс}$ – плотность жидкой стали, т/м³.

Тогда, если: $a = 200$ мм, $b = 1200$ мм, $V = 0,8$ м/мин, $\rho_{жс} = 7,0$ т/м³, имеем:

$$M_p = 0,2 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 7,0 \approx 1,34, \text{ т/мин.}$$

Практическое занятие 6. Внепечная обработка стали.

Цель проведения занятия – ознакомиться со способами внепечной обработки стали, обеспечивающими получение требуемых технологических параметров жидкого металла и служебных характеристик готовой металлопродукции, а также выполнять простейшие расчеты по определению расхода используемых при внепечной обработке материалов.

Задача 19. Определить конечное содержание серы в стали при обработке в ковше синтетическим шлаком с содержанием 25-30% свободной (CaO), 1,5-2,0% (FeO) и 0,05-0,06% (S). Начальное содержание серы в стали 0,03-0,04%, а расход синтетического шлака 2-5% от массы металла.

Решение: Для расчетов можно использовать формулу:

$$q = \frac{100 \cdot (S_n - S_k)}{S_k \cdot \eta_s - S_c}, \% \quad (37)$$

где q – количество синтетического шлака, необходимого для десульфурации металла, % от его массы; S_n , S_k , S_c – соответственно начальное, конечное содержание серы в металле и содержание серы в синтетическом шлаке, %; η_s – коэффициент распределения серы между шлаком и металлом, который вычисляется по формуле:

$$\eta_s = 2,3 \cdot \frac{(CaO)}{(FeO)}. \quad (38)$$

Если принять: (CaO) = 25%, (FeO) = 1,5%, (S) = 0,05%, $q = 5\%$, $S_n = 0,04\%$, из формул (37) и (38) получим:

$$S_k = \frac{S_n + \frac{S_c \cdot q_c}{100}}{1 + 2,3 \cdot \frac{(CaO)}{(FeO)} \cdot \frac{q_c}{100}} = \frac{0,04 + 0,05 \cdot 0,05}{1 + 2,3 \cdot \frac{25}{1,5} \cdot 0,05} = 0,015\%.$$

Задача 20. Определить расход аргона для уменьшения содержания водорода в нераскисленной стали от 0,0008-0,0005% до 0,0005-0,0003% при температуре металла 1873-1923К.

Решение: Для вычисления расхода аргона можно использовать упрощенное уравнение:

$$V_{Ar} = 224 \cdot K_n^2 \cdot P \cdot \left(\frac{1}{C_k} - \frac{1}{C_n} \right) / (10^5 \cdot M \cdot \mu), \text{ м}^3/\text{т}, \quad (39)$$

где V_{Ar} – расход аргона, м³/т; P – давление газа над металлом, Па; C_k и C_n – конечное и начальное содержание удаляемого газа, соответственно, %, M – молекулярная масса удаляемого газа; μ – КПД процесса (принимается для нераскисленной стали равным 0,7), доли единицы; K_n – константа равновесия реакции растворения газа в металле при заданной температуре. Для водорода это значение определим из формулы:

$$\lg K_n = -\frac{1900}{T} - 1,577, \quad (40)$$

где \lg – десятичный логарифм; T – температура металла, К.

Приняв: $C_k = 0,0003\%$, $C_n = 0,0006\%$, $T = 1873\text{К}$, $P = 1 \cdot 10^5$ Па, определим K_n и V_{Ar} :

$$\lg K_n = -\frac{1900}{1873} - 1,577 = -2,5914; \quad K_n = 0,00256,$$

$$V_{Ar} = 224 \cdot 0,00256^2 \cdot 10^5 \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,0003} - \frac{1}{0,0006} \right)}{(10^5 \cdot 2 \cdot 0,7)} = 1,75 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Задача 21. Определить теоретически возможную степень дефосфорации передельного чугуна (η_p) в чугуновозном ковше расплавленным шлаком, который содержит компоненты – дефосфораторы, в условиях

равновесия. Коэффициент распределения фосфора между металлом и шлаком (L_p) изменяется от 20 до 30, начальное и конечное содержание фосфора в металле $[P]_н$ и $[P]_к$, соответственно, составляют (0,15-0,30)% и (0,01-0,05)%, начальное содержание фосфора в шлаке $(P)_н$ – (1,5-2,0)%, кратность шлака $(\lambda) \cdot 100$ – (2,0-3,0), масса шлака $m_{ш}$ и масса металла m_m соответственно (2-3) т и (90-100) т.

Решение: Степень дефосфорации чугуна в условиях равновесия можно рассчитать по формуле:

$$\eta_p = ([P]_н - [P]_к) \cdot 100 - \lambda \cdot (L_p - (P)_н) / [P]_н / (1 + 0,01 \cdot \lambda \cdot L_p). \quad (41)$$

Кратность шлака λ равняется:

$$\lambda = (m_{ш} / m_m) \cdot 100. \quad (42)$$

Принимая: $(L_p) = 20$; $[P]_н = 0,15\%$; $[P]_к = 0,05\%$; $(P)_н = 2,0\%$; $m_{ш} = 2$ т; $m_m = 100$ т получим:

$$\begin{aligned} \eta_p &= (0,15 - 0,05) \cdot 100 - \frac{2}{100} \cdot 100 \cdot (20 - 2 / 0,15) / (1 + 0,01 \cdot 2 \cdot 20) = \\ &= 0,1 \cdot 100 - 13,3 / 1,4 = 10 - 9,7 = 0,3\%. \end{aligned}$$

Задача 22. Определить скорость ввода порошковой проволоки в ковш с жидкой сталью в зависимости от высоты слоя жидкой стали в ковше (H , м), толщины оболочки проволоки (δ , мм), температуры стали (T , °C).

Решение: Для вычисления скорости ввода порошковой проволоки в ковш можно использовать упрощенную формулу:

$$V_n = \frac{K \cdot H \cdot (0,99 + 170 \cdot \delta)}{1730 - T}, \quad (43)$$

где H – высота слоя жидкой стали нижней зоны ковша, м; δ – толщина оболочки, мм; T – температура жидкой стали °C; K – коэффициент, кото-

рый учитывает изменения температуры стальной оболочки в придонной части сталеразливочного ковша, град/(м·с); 170 – безразмерный экспериментальный коэффициент; 0,99 – экспериментальная величина (м) при вычислении скорости ввода порошковой проволоки в нижнюю зону ковша (каждая зона составляет 1/3 общей глубины ввода проволоки).

При вычислении скорости ввода порошковой проволоки в среднюю зону (V_c), или в верхнюю зону (V_b) значение этого коэффициента в формуле (43) будет составлять соответственно 1,57 и 2,19 м.

Принимая высоту слоя жидкой стали $H = 2$ м, толщину оболочки проволоки $\delta = 0,4$ мм или $\delta = 0,0004$ м, температуру стали $T = 1630^\circ\text{C}$, $K = 100$ град/(м·с) получим:

$$V_n = \frac{100 \cdot 2 \cdot (0,99 + 170 \cdot 0,0004)}{1730 - 1630} = \frac{200 \cdot 1,058}{100} = 2,116 \text{ м/с.}$$

Приложение А. Варианты исходных данных к задачам

№	Варианты заданий		
	1	2	3
1	$G_p = 25$ кг/т $T_{\text{макс}} = 100$ т $\%Fe_2O_3 = 70$	$G_p = 26$ кг/т $T_{\text{макс}} = 160$ т $\%Fe_2O_3 = 75$	$G_p = 27$ кг/т $T_{\text{макс}} = 250$ т $\%Fe_2O_3 = 80$
2	$G_{\text{мбр}} = 35$ кг/т $T_{\text{макс}} = 100$ т $t_{\text{ст}} = 1600^\circ\text{C}$	$G_{\text{мбр}} = 37$ кг/т $T_{\text{макс}} = 160$ т $t_{\text{ст}} = 1610^\circ\text{C}$	$G_{\text{мбр}} = 36$ кг/т $T_{\text{макс}} = 250$ т $t_{\text{ст}} = 1615^\circ\text{C}$
3	Данные получены в задачах 1 и 2.	Данные получены в задачах 1 и 2.	Данные получены в задачах 1 и 2.
4	$O_1 = 68$ кг/т $K = 0,95$	$O_1 = 69$ кг/т $K = 0,96$	$O_1 = 70$ кг/т $K = 0,97$
5	$T_{\text{макс}} = 130$ т; $t_{\text{ст}} = 1480^\circ\text{C}$; доля тепла чугуна – 48%; доля теплоемкости стали – 70%; доля металлолома – 20%; выход стали – 90%	$T_{\text{макс}} = 160$ т; $t_{\text{ст}} = 1485^\circ\text{C}$; доля тепла чугуна – 49%; доля теплоемкости стали – 71%; доля металлолома – 21%; выход стали – 92%	$T_{\text{макс}} = 300$ т; $t_{\text{ст}} = 1490^\circ\text{C}$; доля тепла чугуна – 51%; доля теплоемкости стали – 72%; доля металлолома – 23%; выход стали – 91%
6	$M_1 = 730$ кг $M_2 = 270$ кг $M_3 = 42$ кг $M_4 = 29$ кг $M_5 = 4$ кг $M_6 = 7,1$ кг $M_7 = 18$ кг $M_8 = 7,5$ кг $M_9 = 1,8$ кг	$M_1 = 735$ кг $M_2 = 265$ кг $M_3 = 43$ кг $M_4 = 29,5$ кг $M_5 = 4,1$ кг $M_6 = 7,2$ кг $M_7 = 19$ кг $M_8 = 7,6$ кг $M_9 = 1,85$ кг	$M_1 = 745$ кг $M_2 = 255$ кг $M_3 = 43$ кг $M_4 = 30,5$ кг $M_5 = 4,3$ кг $M_6 = 7,3$ кг $M_7 = 20$ кг $M_8 = 7,7$ кг $M_9 = 1,90$ кг

№	Варианты заданий		
	1	2	3
7	G = 130 т τ = 42 мин Π = 8% Выход стали –88%	G = 160 т τ = 45 мин Π = 9% Выход стали –89%	G = 250 т τ = 51 мин Π = 11% Выход стали –91%
8	t = 1200°C Δt = 125°C M ₁ = 745 кг	t = 1205°C Δt = 120°C M ₁ = 750 кг	t = 1200°C Δt = 130°C M ₁ = 755 кг
9	Δ[C] = 2,8% Δ[Si] = 0,5% Δ[Mn] = 0,4% Δ[P] = 0,08% M ₁ = 730 кг M ₂ = 270 кг	Δ[C] = 2,9% Δ[Si] = 0,6% Δ[Mn] = 0,45% Δ[P] = 0,09% M ₁ = 735 кг M ₂ = 265 кг	Δ[C] = 3,0% Δ[Si] = 0,8% Δ[Mn] = 0,5% Δ[P] = 0,10% M ₁ = 745 кг M ₂ = 255 кг
10	M ₃ = 120 кг (FeO) = 20% (Fe ₂ O ₃) = 20% (Fe ₃ O ₄) = 98% M ₄ = 0,8%	M ₃ = 130 кг (FeO) = 21% (Fe ₂ O ₃) = 5% (Fe ₃ O ₄) = 98,2% M ₄ = 0,9%	M ₃ = 140 кг (FeO) = 22% (Fe ₂ O ₃) = 6% (Fe ₃ O ₄) = 98,6% M ₄ = 1,1%
11	B = 3,0 M ₁ = 730 кг M ₂ = 270 кг [Si] _{мл} = 0,1% [Si] _ч = 0,2% (SiO ₂) _{мл} = 60% (SiO ₂) _ф = 2% (SiO ₂) ₃ = 1% m = 0,5% M ₄ = 2 кг (CaO) ₃ = 96% (CaO) _ф = 55%	B = 3,3 M ₁ = 740 кг M ₂ = 260 кг [Si] _{мл} = 0,15% [Si] _ч = 0,4% (SiO ₂) _{мл} = 65% (SiO ₂) _ф = 2,5% (SiO ₂) ₃ = 1,5% m = 1,0% M ₄ = 2,5 кг (CaO) ₃ = 96,5% (CaO) _ф = 56%	B = 3,4 M ₁ = 750 кг M ₂ = 250 кг [Si] _{мл} = 0,2% [Si] _ч = 0,6% (SiO ₂) _{мл} = 70% (SiO ₂) _ф = 3,6% (SiO ₂) ₃ = 2% m = 1,5% M ₄ = 3 кг (CaO) ₃ = 97% (CaO) _ф = 57%

№	Варианты заданий		
	1	2	3
12	M_1 и M_2 – из (10) Другие данные – средние величины из (11)	M_1 и M_2 – из (10) Другие данные – средние величины из (11)	M_1 и M_2 – из (10) Другие данные – средние величины из (11)
13	$M_1 = 760$ кг $M_2 = 240$ кг $M_3 = 80$ кг $\Delta[C] = 3,3\%$ $\{CO_2\} = 3,0\%$ $\{H_2O\} = 0,4\%$ $M_4 = 48$ м ³ /Т $K = 0,94$	$M_1 = 750$ кг $M_2 = 250$ кг $M_3 = 85$ кг $\Delta[C] = 3,35\%$ $\{CO_2\} = 4,0\%$ $\{H_2O\} = 0,6\%$ $M_4 = 49$ м ³ /Т $K = 0,95$	$M_1 = 745$ кг $M_2 = 255$ кг $M_3 = 90$ кг $\Delta[C] = 3,4\%$ $\{CO_2\} = 6,0\%$ $\{H_2O\} = 0,8\%$ $M_4 = 51$ м ³ /Т $K = 0,97$
14	$K_r = 13,0\%$ $K_d = 1\%$ $K_y = 2\%$ $a = 0,2$ м $b = 0,2$ м $l = 2,6$ м	$K_r = 13,5\%$ $K_d = 1,2\%$ $K_y = 2,2\%$ $a = 0,22$ м $b = 0,22$ м $l = 2,7$ м	$K_r = 14,0\%$ $K_d = 1,3\%$ $K_y = 2,4\%$ $a = 0,24$ м $b = 0,24$ м $l = 2,8$ м
15	$d = 50$ мм $H_M = 0,7$ м $h_{III} = 0,1$ м	$d = 52$ мм $H_M = 0,65$ м $h_{III} = 0,12$ м	$d = 54$ мм $H_M = 0,7$ м $h_{III} = 0,13$ м
16	$\delta = 75$ мм $L = 18$ м $K = 28$ мм/мин	$\delta = 100$ мм $L = 19$ м $K = 28,2$ мм/мин	$\delta = 125$ мм $L = 20$ м $K = 28,6$ мм/мин
17	$M_p = 1,5$ т/мин $d = 40$ мм	$M_p = 1,8$ т/мин $d = 42$ мм	$M_p = 2,0$ т/мин $d = 44$ мм
18	$a = 150$ мм $b = 1000$ мм $V = 0,7$ м/мин	$a = 175$ мм $b = 1050$ мм $V = 0,75$ м/мин	$a = 200$ мм $b = 1100$ мм $V = 0,8$ м/мин

№	Варианты заданий		
	1	2	3
19	$S_H = 0,03\%$ $S_C = 0,05\%$ $q = 2\%$ $(CaO) = 25\%$ $(FeO) = 1,5\%$	$S_H = 0,032\%$ $S_C = 0,052\%$ $q = 3\%$ $(CaO) = 26\%$ $(FeO) = 1,6\%$	$S_H = 0,034\%$ $S_C = 0,054\%$ $q = 4\%$ $(CaO) = 28\%$ $(FeO) = 1,8\%$
20	$C_K = 0,0008\%$ $C_H = 0,0005\%$ $T = 1873K$	$C_K = 0,0007\%$ $C_H = 0,0004\%$ $T = 1873K$	$C_K = 0,0006\%$ $C_H = 0,0004\%$ $T = 1873K$
21	$L_p = 20; [P]_H = 0,15\%$ $[P]_K = 0,02\%$ $(P)_H = 1,5\%$ $m_{ш} = 2 \text{ т}; m_M = 95 \text{ т}$	$L_p = 30; [P]_H = 0,2\%$ $[P]_K = 0,03\%$ $(P)_H = 1,7\%$ $m_{ш} = 2,4 \text{ т}; m_M = 98 \text{ т}$	$L_p = 25; [P]_H = 0,3\%$ $[P]_K = 0,04\%$ $(P)_H = 1,8\%$ $m_{ш} = 2,8 \text{ т}; m_M = 96 \text{ т}$
22	$H = 2,2 \text{ м}; \delta = 0,36 \text{ мм}$ $T = 1620^\circ C$ $K = 102 \text{ град/м с}$	$H = 2,1 \text{ м}; \delta = 0,38 \text{ мм}$ $T = 1625^\circ C$ $K = 103 \text{ град/м с}$	$H = 2,3 \text{ м}; \delta = 0,4 \text{ мм}$ $T = 1640^\circ C$ $K = 105 \text{ град/м с}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. – Москва : Мир, 2003. – 528 с.
2. Баптизманский, В. И. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкция агрегатов / В. И. Баптизманский, М. Я. Меджибожский, В. И. Охотский. – Киев –Донецк : Высшая школа, 1984. – 343 с.
3. Ойкс, Г. Н. Производство стали (расчеты) / Г. Н. Ойкс, Х. М. Иоффе. – 3-е изд. – Москва : Металлургия, 1969. – 520 с.
4. Якушев, А. М. Справочник конвертерщика / А. М. Якушев. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1990. – 160 с.
5. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк : ДОННТУ, 2011. – 482 с.
6. Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками / Д. А. Дюдкин [и др.]; под научной редакцией Д. А. Дюдкина. – Донецк, ООО «Юго-восток», 2002. – 296 с.
7. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів з курсу «Металургія сталі» / В. Л. Жук, В. Є. Ухін. – Донецьк : ДОННТУ, 2010. – 26 с.