

Анотація

Переворочаєв М. М., Крикунов Б. П.

Вдосконалення електричних та технологічних режимів доведення металу на установці ківш-піч

Проведено дослідження стосовно вдосконалення електричних та технологічних режимів доведення металу на установці ківш-піч. Показано, що більш ефективним та економічним є електричний режим доведення, коли електро-дугове нагрівання металу у початковий період обробки проводять замість першої на першій-шостій ступенях напруги. При цьому економія електроенергії досягається без збільшення тривалості доведення та зниження продуктивності. Оптимізовано витрати: вапняку для забезпечення необхідної товщини шлаку у відповідності до встановленої довжини дуги; флюсів для різних умов фактичного формування шлаку та магнезитового порошку при наведенні рафінувального шлаку.

Ключові слова

позапічна обробка, дугове нагрівання, дзеркало металу, електричний режим, технологічний режим, шлакоутворювальні елементи, пічний трансформатор, довжина дуги, ступені напруги, товщина шару шлаку, оксид магнію, магнезитовий порошок, рафінувальний шлак

Summary

Perevorotchaev N., Krikunov B.

Improvement of electric and technological modes of metal finishing in a ladle furnace

Research for improvement of electrical and technological modes of metal finishing in ladle furnace was carried out. It was proved that the most effective and economical is the electric one, while arc heating was conducted within initial period on 1-6 voltage stage instead of stage 1. Economy of electric power in that way is achieved without prolonging the finishing time and reducing productivity. Lime expenses are optimized for providing of required slag layer thickness according to the electric arc length and flux for different conditions of actual slag and magnesite powder forming while building up the fining slag.

Keywords

aftertreatment, electric arc heating, heel of metal, electrical mode, technological mode, slag-forming material, furnace transformer, voltage stage, slag layer thickness, magnesium oxide, magnesite powder, fining slag

УДК 669.18

Н. М. Переворочаєв

Филиал «Металлургический комплекс» ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод», Донецк

Прогнозирование длительности доводки металла на установке ковш-печь (УКП)

Рассмотрены вопросы прогнозирования длительности доводки полупродукта на УКП. Определены, проанализированы и математически описаны условия, влияющие на длительность отдельных условных этапов доводки. На основании выявленных взаимосвязей между параметрами получено уравнение для расчета длительности доводки, с помощью которого возможно определять продолжительность обработки на УКП, прогнозировать время окончания обработки и гибко управлять доводкой при различных ситуациях технологического процесса.

Ключевые слова: дуговой нагрев, полупродукт, плавка, длительность обработки, прогнозирование, шлакообразующие материалы, ферросплавы, температура, тепловые потери, бестоковый режим

Основой технологического режима доводки металла на УКП является комплекс последовательных операций по вводу шлакообразующих и разжижающих материалов, ферросплавов, порошковых проволок, а также по перемешиванию металла инертным газом, отбору проб и замеру температуры металла и др. Продолжительность каждой операции определяет общую длительность обработки (доводки). Прогнозирование длительности обработки полу-

продукта является важным элементом в организации синхронной работы установки ковш-печь (УКП) и машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Длительность обработки металла на УКП

Длительность разливки плавов на МНЛЗ превышает время их обработки на УКП. Следовательно, при обработке плавов для серийной разливки на МНЛЗ между ними необходимо делать перерыв.

Продолжительность этого перерыва зависит главным образом от продолжительности разливки, выдержки металла в ковше после обработки и самой обработки.

Основными задачами обработки стали на ковше-печи являются доводка и усреднение металла по химическому составу и температуре, а также снижение содержания в нем неметаллических включений. Для выполнения этих задач на УКП производят перемешивание металла в ковше инертным газом (аргоном), электродугового нагрева металла, порционную присадку в ковш необходимых шлакообразующих материалов и ферросплавов, отбор проб металла для химического анализа и замеры температуры.

При прогнозировании длительности внепечной обработки необходимо учитывать продолжительность отдельных технологических операций.

Если перемешивание металла аргоном производится в течение всего времени обработки металла на УКП, то остальные операции занимают только часть этого времени и их продолжительность зависит от исходного химического состава, температуры и длительности выдержки полупродукта в ковше. Одни операции можно проводить одновременно с дуговым нагревом металла (автоматизированная присадка шлакообразующих или ферросплавов). Другие производят только при выключенной дуге отдельно друг от друга (замер температуры, отбор проб, ручная присадка науглероживателя и раскислителей, ввод в металл алюминиевой катанки и порошковой проволоки). Продолжительность каждой из технологических операций не является постоянной величиной, а зависит от конкретных условий обработки. Практика работы УКП показывает, что продолжительность технологических операций при заданных условиях может быть определена на основе статистических данных или расчетным способом. Если несколько операций производить одновременно, то при расчете длительности обработки достаточно учесть время наиболее продолжительной из них.

Для решения задачи прогнозирования длительности обработки разделим обработку на условные периоды электродугового нагрева металла и обработку в бестоковом режиме. Определим продолжительность каждого из них отдельно.

Для расчета времени, которое будет затрачено на электродуговой нагрев металла, на УКП необходимо учитывать скорость дугового нагрева металла (зависит от выбранного электрического режима и иных факторов), разницу между температурой начала и окончания обработки, тепловые потери от присадки шлакообразующих материалов и ферросплавов, скорость охлаждения металла в перерывах между включениями дуги и длительность этих перерывов, а также величину перегрева металла над температурой окончания обработки.

В бестоковый период обработки время затрачивается на замер температуры, отбор проб, ручную присадку алюмофлюса и науглероживателя, ввод порошковой проволоки с помощью трайбаппарата и ожидание химического анализа последней пробы.

В результате инженерно-логического анализа вы-

явлена взаимосвязь перечисленных факторов и получены уравнения (1)-(3) для расчета длительности обработки плавов.

$$\tau_{\text{бр}} = \frac{(t_{\text{ко}} + t_{\text{пер}}) - t_{\text{н.о}} + t_{\text{п1}}}{V_{\text{н}}} + \tau_{\text{бр}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ко}}$ – температура выдачи металла на разливку, °С (приводится в технологической карте на выплавляемую сталь); $t_{\text{н.о}}$ – температура начала обработки, °С; $V_{\text{н}}$ – скорость дугового нагрева металла, °С/мин; $\tau_{\text{бр}}$ – длительность обработки в бестоковом режиме, мин; $t_{\text{п1}}$ – температурные потери в период между началом обработки и окончанием дугового нагрева металла, °С; $t_{\text{пер}}$ – температурный перегрев металла.

Температурные потери в период между началом обработки и окончанием дугового нагрева металла можно определить по формуле

$$t_{\text{п1}} = t_{\text{пш}} + t_{\text{пф}} + \tau_{\text{пер}} V_{\text{ох1}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{пш}}$ – потери температуры от присадки шлакообразующих материалов, °С; $t_{\text{пф}}$ – потери температуры от присадки ферросплавов, °С; $\tau_{\text{пер}}$ – суммарная длительность перерывов между включениями дуги, мин; $V_{\text{ох1}}$ – скорость охлаждения металла в перерывах между включениями дуги, °С/мин.

Температурный перегрев металла можно определить по формуле

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{н2}} + \tau_{\text{ко}} V_{\text{ох2}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{н2}}$ – температурные потери при присадке Al, FeTi, SiCa; $\tau_{\text{ко}}$ – время между окончанием дугового нагрева и окончанием обработки; $V_{\text{ох2}}$ – скорость охлаждения металла при работе в бестоковом режиме.

С помощью полученного уравнения (1) можно определять продолжительность обработки, прогнозировать время окончания обработки и гибко управлять доводкой при различных ситуациях технологического процесса.

Для получения информации о каждом технологическом параметре исследовали различные режимы обработки: температурный, электрический, продувочный, шлакообразования и раскисления. Полученные данные применяли для определения потерь тепла при использовании различных материалов, скорости дугового нагрева металла, расчета оптимальной массы шлакообразующих и раскисляющих материалов.

Влияние длительности выдержки полупродукта в ковше до обработки на температуру начала обработки

Для расчета фактической скорости нагрева металла и дальнейшего прогнозирования длительности внепечной обработки возникла необходимость замерять температуру полупродукта перед обработкой. Такие замеры производили на 46 плавках текущего производства, разливаемых на МНЛЗ.

Из рис. 1 видно, что температура полупродукта в ковше снижается в течение одного-полутора часов после выпуска, а при достижении ≈ 1515 °С

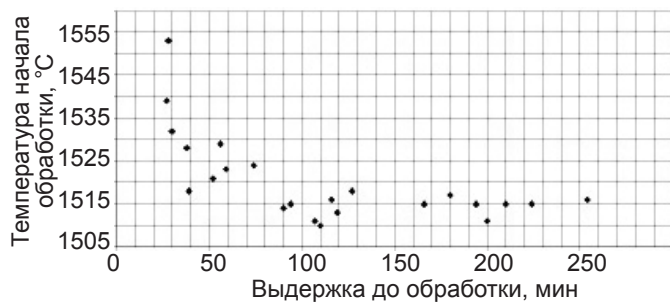


Рис. 1. Зависимость температуры металла в ковше в начале обработки от его выдержки после выпуска из мартеновской печи

остаётся практически неизменной. Это можно объяснить тем, что во время выпуска и в начале выдержки происходит нагрев стенок сталеразливочного ковша, растворяются ТШС и ферросплавы. Температура металла при этом быстро снижается. В дальнейшем теплообмен замедляется, так как футеровка ковша прогревается, ковш накрыт крышкой – потери тепла в атмосферу минимальны. Возможно, что при достижении металлом температуры ликвидуса (для полупродукта низкоуглеродистых и низколегированных сталей она колеблется от 1511 до 1516 °С) начинается кристаллизация металла у дна и стенок ковша.

В табл. 1 приведены усредненные экспериментальные данные о температуре начала обработки металла для полупродукта низкоуглеродистых и низколегированных сталей при различной длительности выдержки металла в ковше.

Если отсутствует возможность измерить температуру металла в ковше перед началом обработки, то для ее определения можно использовать средние значения, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Температура металла в начале обработки в зависимости от продолжительности его выдержки в ковше*

Время выдержки металла до обработки, мин	Температура начала обработки для различных групп стали ($t_{но}$), °С	
	низкоуглеродистые	низколегированные
27-89	$\frac{1518-1553}{1530}$	$\frac{1514-1521}{1519}$
90-225	$\frac{1510-1518}{1515}$	$\frac{1510-1512}{1511}$

*В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средние значения

Определение скорости дугового нагрева металла

При работе УКП необходимо, чтобы металл нагревался с максимальной скоростью. Для этого используют электрический режим, позволяющий подводить максимальную активную мощность от трансформатора, что обеспечивают работа на первой ступени напряжения и третья кривая тока (максимальные ток и напряжение). Согласно литературным данным, первая ступень напряжения обеспечивает лучшие электрические показатели работы УКП [1].

На исследуемых 46 плавках текущего производства нагрев металла проводили с применением вы-

шеуказанного электрического режима на протяжении всей обработки. По ходу нагрева производили хронометраж между замерами температуры и затем рассчитывали фактические скорости нагрева металла. При этом учитывался охлаждающий эффект от присадки шлакообразующих и ферросплавов.

Скорость дугового нагрева металла для плавков с различной выдержкой перед обработкой представлена в табл. 2, где видно, что скорость электродугового нагрева металла обратно пропорциональна выдержке металла в ковше после выпуска. Рассмотрим динамику нагрева низкоуглеродистого металла в течение обработки, рис. 2.

Если перед началом обработки полупродукт в ковше относительно однороден по температуре и физическому состоянию, то скорость электродугового нагрева металла по ходу обработки должна меняться незначительно и достигнет максимума в течение первых 20 мин обработки: 1 – выдержка менее 90 мин; 2 – 90-180; 3 – более 180.

Из рис. 2 видно, что при неизменном электрическом режиме скорость нагрева полупродукта на УКП постоянно изменяется, она минимальна в начале и растет в течение обработки. Максимальную скорость нагрева в начале обработки (3,8 °С/мин) наблюдали в группе плавков, имеющих выдержку в ковше менее 1,5 ч, а минимальная (2 °С/мин) – на плавках с выдержкой более 3 ч. Плавки с выдержкой до получаса достигали максимальной скорости нагрева (5,0-5,5 °С/мин) в среднем через 20-25 мин электродугового нагрева; плавки с выдержкой 90-180 мин – через 25-30 мин, а часть плавков с выдержкой более

Таблица 2

Скорость нагрева металла на УКП при различной выдержке перед обработкой*

Длительность выдержки плавки до обработки, ч	Скорость нагрева металла на 1-й ступени печного трансформатора ($V_{н}$), °С/мин	
	низкоуглеродистые стали	низколегированные стали
0-1,00	$\frac{4.2-4.7}{4.5}$	$\frac{4.3-4.8}{4.5}$
1,01-2,00	$\frac{3.7-4.7}{4.2}$	$\frac{3.6-4.4}{4.1}$
2,01-3,00	$\frac{3.6-4.5}{4.1}$	$\frac{3.6-4.0}{3.8}$
больше 3	$\frac{2.7-3.9}{3.1}$	$\frac{2.9-3.7}{3.2}$

*В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средние значения

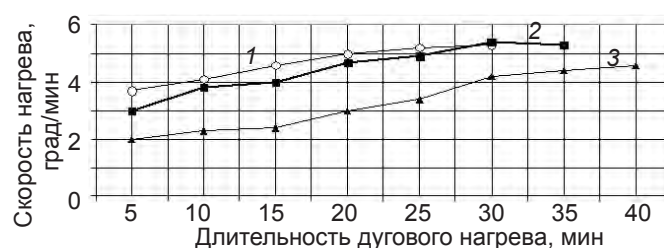


Рис. 2. Изменение скорости нагрева металла в ходе обработки от выдержки металла в ковше до обработки (1 – <20 мин; 2 – 90-180; 3 – >180) для низколегированной стали (по данным 26 плавков текущего производства)

180 мин не достигали этой скорости и через 35-40 мин обработки. Возможно, что в начале обработки часть энергии дуги, подводимой к металлу, расходуется на разогрев футеровки ковша, потери тепла от излучения, а при длительной выдержке металла до обработки – плавление закристаллизовавшейся корки металла у днища и стенок ковша. Вероятно, существенные физические превращения металла в ковше происходят после 3 ч выдержки.

При прогнозировании длительности обработки металла на УКП определить скорость электродугового нагрева металла можно, пользуясь данными, представленными в табл. 2.

Определение потерь тепла при присадках шлакообразующих материалов и ферросплавов

Ввод ферросплавов и шлакообразующих в ковш производится одновременно с дуговым нагревом, поэтому не удалось получить достаточное количество достоверных данных для уточнения охлаждающего эффекта при их присадке. Эти данные были взяты из известных источников и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Ориентировочный охлаждающий эффект от ввода ферросплавов и шлакообразующих материалов в ковш

Материал	Охлаждающий эффект, °C/(100 кг)
FeMn	1,7
FeSi 65%-ный	0,04
FeTi	0,8
Известь	2,0
Магнезит	2,0
Алюмофлюс	1,0
SiMn	1,1
FeGr	1,6
Науглероживатель	3,0-4,0

Порошковую проволоку с силикокальцием вводят в ковш после окончания дугового нагрева металла. Это дает возможность замерять температуру металла перед и после ввода проволоки и уточнить охлаждающий эффект ее присадки. Охлаждающий эффект от использования ПП СК30 колебался в пределах 0,5-3,0 °C/(100 м) и в среднем составил 1,7 °C/(100 м).

FeV присаживают 26-28 кг на плавку, причем не на всех плавках. Для расчета примем потери тепла от присадки FeV равными 0,5 °C на плавку.

В табл. 4 представлены обработанные статистические данные о массе присаживаемых ферросплавов и расчетное падение температуры металла при их присадке в период электродугового нагрева.

Для определения температурного перегрева металла необходимо знать потери тепла при присадке материалов после окончания электродугового нагрева металла.

В табл. 5 приведены обработанные статистические данные о количестве ферросплавов, присаживаемых после окончания дугового нагрева, и расчетное падение температуры металла при их присадке.

Изменение температуры металла при присадках шлакообразующих материалов

Выполнен расчет снижения температуры металла при присадках шлакообразующих материалов. Для этого величину расчетной массы присаживаемого материала умножили на охлаждающий эффект от его присадки. Результаты расчета приведены в табл. 6 (низкоуглеродистые стали) и 7 (низколегированные стали).

Определение длительности обработки в бестоковом режиме и потерь температуры при этом режиме

Работу в бестоковом режиме условно можно разделить на два периода: 1 – отбор проб, замер температуры, ручная присадка материалов в промежутках между включениями дуги; 2 – присадка FeTi, FeV, ввод трайбаппаратом алюминиевой катанки и

Таблица 4

Расчетный уровень падения температуры металла при присадке ферросплавов*

Группа сталей	Ферросплавы	Масса присадки, кг	Потери температуры от присадки, °C	
			от каждого вида	общие
Низкоуглеродистые	FeMn	$\frac{0-323}{81}$	$\frac{0-5,5}{1,4}$	1,6
	FeSi 65%-ный	$\frac{0-233}{97}$	$\frac{0-0,1}{0,04}$	
	SiMn	$\frac{0-303}{14}$	$\frac{0-3,3}{0,15}$	
Низколегированные	FeMn	$\frac{0-592}{172}$	$\frac{0-10,1}{2,9}$	7,3
	FeSi 65%-ный	$\frac{0-428}{193}$	$\frac{0-0,24}{0,08}$	
	FeGr	$\frac{0-338}{87}$	$\frac{0-5,4}{1,4}$	
	SiMn	$\frac{0-665}{198}$	$\frac{0-7,3}{2,2}$	

*В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средние значения

Потери температуры металла от присадок ферросплавов*

Группа сталей	Ферросплавы	Масса присадки, кг	Потери температуры от присадки ($t_{\text{пф}}$), °С	
			от каждого вида	общие
Низкоуглеродистые	FeTi	$\frac{75-95}{80}$	$\frac{0,6-0,8}{0,64}$	5,0
	SiCa	$\frac{250-300}{258}$	$\frac{4,3-5,1}{4,4}$	
Низколегированные	FeTi	$\frac{80-135}{94}$	$\frac{0,64-1,1}{0,8}$	6,4
	FeB	$\frac{0-28}{25}$	0,5	
	SiCa	300	5,1	

*В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средние значения

Таблица 6

Тепловые потери при присадках шлакообразующих материалов на плавках низкоуглеродистой стали

Толщина шлакового покрова в ковше до обработки, мм	Масса шлака в ковше до обработки, кг	Расчетная оптимальная масса присаживаемой извести, кг	Тепловые потери от присадки извести, °С	Расчетная оптимальная масса присаживаемого алюмофлюса, кг	Тепловые потери от присадки алюмофлюса, °С	Общие тепловые потери ($t_{\text{пш}}$), °С
50	900	1600	32	40	0,4	32,4
60	1080	1400	28	48	0,5	28,5
70	1260	1250	25	56	0,6	25,6
80	1440	1100	22	64	0,6	22,6
90	1620	900	18	72	0,7	18,7
100	1800	750	15	80	0,8	15,8
110	1980	600	12	88	0,9	12,9
120	2160	400	8	96	1,0	9,0
130	2340	250	5	104	1,0	6,0
140	2520	100	2	112	1,1	3,1

Таблица 7

Тепловые потери при присадках шлакообразующих материалов на плавках низколегированной стали

Толщина шлакового покрова в ковше до обработки, мм	Масса шлака в ковше до обработки, кг	Расчетная оптимальная масса присаживаемой извести, кг	Тепловые потери от присадки извести, °С	Расчетная оптимальная масса присаживаемого алюмофлюса, кг	Тепловые потери от присадки алюмофлюса, °С	Общие тепловые потери ($t_{\text{пш}}$), °С
50	900	1600	32	59	0,6	32,6
60	1080	1400	28	71	0,7	28,7
70	1260	1250	25	82,5	0,8	25,8
80	1440	1100	22	94,5	0,9	22,9
90	1620	900	18	106	1,1	19,1
100	1800	750	15	118	1,2	16,2
110	1980	600	12	130	1,3	13,3
120	2160	400	8	141,5	1,4	9,4
130	2340	250	5	153,5	1,5	6,5
140	2520	100	2	165	1,7	3,7

силикокальциевой проволоки, ожидание химического анализа проб после окончания дугового нагрева металла.

Разделить эти периоды необходимо потому, что они проводятся при продувке стали аргоном с различной интенсивностью, следовательно, с различными тепловыми потерями. В первый период поте-

ри тепла в среднем составят 1 °С/мин, а во второй – 0,4 °С/мин.

Продолжительность работы в бестоковом режиме и величина снижения температуры металла в этот период были определены на 46 плавках. Данные приведены в табл. 8, их необходимо использовать при прогнозировании длительности обработки плавков на УКП.

Уровень снижения температуры металла в бестоковом режиме работы УКП*

Группа стали	Длительность первого периода ($\tau_{пер}$), мин	Потери температуры в первый период ($\tau_{ко} V_{ox1}$), °C	Длительность второго периода ($\tau_{ко}$), мин	Потери температуры во второй период ($\tau_{ко} V_{ox2}$), °C	Общая длительность без тока ($\tau_{бт}$), мин	Общие потери тепла, °C
Низкоуглеродистые	$\frac{3-8,5}{4,9}$	$\frac{3-8,5}{4,9}$	$\frac{13,5-14,5}{14}$	$\frac{5,4-5,8}{5,6}$	16,5-23 18,9	$\frac{7,4-14,3}{10,5}$
Низколегированные	$\frac{4-10}{6,1}$	$\frac{4-10}{6,1}$	$\frac{14,5-15}{14,7}$	$\frac{5,8-6}{5,9}$	18,5-25 20,8	$\frac{9,8-16}{12}$

*В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средние значения

Пример расчета длительности обработки полупродукта на УКП

В качестве примера рассчитаем длительность обработки плавки низкоуглеродистой стали марки А36 с выдержкой в ковше 2,5 ч, толщиной шлакового покрова до обработки 80 мм. Воспользуемся для этого формулой. При $t_{ко} = 1585$ °C; $t_{пер} = 10,6$ °C; $t_{но} = 1515$ °C (табл. 1); $V_n = 4,1$ °C/мин (табл. 2); $\tau_{бт} = 18,9$ мин (табл. 8) получается

$$\tau_{бт} = \frac{(t_{ко} + t_{пер}) - t_{н.о} + t_{п1}}{V_n} + \tau_{бт} =$$

$$= \frac{(1585 + 10,6) - 1515 + 29,1}{4,1} + 18,9 = 45,7.$$

При $t_{пш} = 22,6$ °C (табл. 6); $t_{пф} = 1,6$ °C (табл. 4);

$\tau_{пер} = 4,9$ мин (табл. 8); $V_{ox1} = 1$ °C/мин – $t_{п1} = t_{пш} + t_{пф} + \tau_{пер} V_{ox1} = 22,6 + 1,6 + 4,9 \times 1 = 29,1$ °C (4).

Если $t_{п2} = 5$ °C (табл. 5); $\tau_{ко} = 14$ мин (табл. 8); $V_{ox2} = 0,4$ °C/мин, то $t_{пер} = t_{п2} + \tau_{ко} V_{ox2} = 5 + 14 \times 0,4 = 10,6$ (3).

Прогнозируемая длительность обработки данного металла должна составить 45,7 мин.

Выводы

Решена задача прогнозирования длительности доводки (обработки) металла на УКП. В основу взят комплекс уравнений по определению продолжительности отдельных условных периодов электродугового нагрева и работы в бестоковом режиме, в которые входят основные параметры технологического режима. Прогнозирование длительности доводки полупродукта является важным элементом в организации синхронной работы УКП и МНЛЗ.



ЛИТЕРАТУРА

1. Производство стали на агрегате ковш-печь / Д. А. Дюдкин, С. Ю. Бать, С. Е. Гринберг и др. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – 306 с.

Анотація

Переворочаєв М. М.

Прогнозування тривалості доведення металу на установці ківш-піч (УКП)

Розглянуто питання прогнозування тривалості доведення напівпродукту на установці ківш-піч (УКП). Визначено, проаналізовано та математично описано параметри, які впливають на тривалість окремих умовних етапів доведення. На основі виявлених взаємозв'язків отримали рівняння для розрахунку тривалості доведення, за допомогою якого можливо визначити тривалість обробки на УКП та гнучко керувати доведенням за різних обставин технологічного процесу.

Ключові слова

дугове нагрівання, напівпродукт, плавка, тривалість обробки, прогнозування, шлакоутворювальні матеріали, феросплави, температура, теплові втрати, бестоковий режим

Summary

Perevorotchaev N., Krikunov B.

Forecast of metal finishing duration in a ladle furnace

The issue of forecast of metal finishing duration in ladle furnace was scrutinized. Conditions that influence at some relative finishing stage were defined, analyzed and described in mathematical formulation. On the basis of revealed correlations there was obtained an equation that allows to find out time of metal finishing in ladle furnace, to forecast completion time and handle the process flexibly at different conditions.

Keywords

electric arc heating, semiproduct, melting, duration of treatment, forecasting, slag-forming material, ferroalloy, temperature, heat losses, non-current mode