

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В ЭСПЦ КРАМАТОРСКОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

В.М.Сафонов (ДонНТУ, г. Донецк), А.Г.Ковалев, С.Ю.Волков (ОАО
«ЭМСС», г. Краматорск)

Описаны мероприятия по реконструкции ЭСПЦ «ЭНЕРГОМАШ-СПЕЦСТАЛЬ» для повышения производительности оборудования и качества стали

Краматорский завод «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» основан в 1964 году как базовое предприятие атомного и энергетического машиностроения по производству крупных кованных и литых заготовок деталей атомных установок, реакторного оборудования, специальных насосов, паро- и гидротурбин, установок высокого давления. До середины 80-х годов вводились в эксплуатацию производственные мощности завода по жидкой стали, стальному литью и поковкам, которые включают в себя:

- электросталеплавильный цех с дуговыми сталеплавильными печами вместимостью 12, 50 и 2х100 т и возможностью отливки под вакуумом крупных слитков (до 360 т),
- сталелитейный комплекс с механизированными формовочными линиями ПЛ-27 и ЛПМ-75 для отливок массой 0,5 – 30,0 т и участком крупного литья (отливки массой 10 - 100 т) для производства отливок корпусов ГЦН и турбин для атомных электростанций, в том числе из нержавеющей марки стали, а также отделениями обрубки, термообработки, приготовления смесей и пр.;
- кузнечно-прессовый цех с ковочным комплексом на базе прессов усилием 60 Мн, 150 Мн, нагревательными и термическими печами;
- комплекс механических цехов с полным циклом механической обработки изделий.

Политический и экономический кризис конца 80-х годов, а также распад Советского Союза оказали крайне негативное влияние на финансовую устойчивость подавляющего большинства предприятий Украины. Помимо того, для специализированного завода «ЭНЕРГОМАШ-СПЕЦСТАЛЬ», который выпускал литые и кованные заготовки индивидуального и мелкосерийного производства, положение усугубилось «шоковым» состоянием атомного машиностроения в связи с аварией на Черно-

быльской АЭС.

С 2000 года ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» модернизирует и восстанавливает мощности, стабильно наращивает объёмы производимой продукции, соответствующей мировым стандартам - специальных литых и кованных изделий индивидуального и мелкосерийного производства для тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения, металлургической, цементной, горнодобывающей и других отраслей промышленности Украины, ближнего и дальнего зарубежья. Предпочтение отдаётся выпуску изделий с окончательной механической обработкой.

Развитие и модернизация электросталеплавильного цеха ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» на базе современных технологий является, с одной стороны, обеспечением повышения конкурентной способности продукции, а, с другой, демонстрацией направления развития предприятия, что, несомненно, повышает его инвестиционную привлекательность.

Для производства слитков широкого марочного состава завод на первом этапе реконструкции предполагается увеличить производительность ЭСПЦ ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» до 210-230 тыс. т жидкой стали в год, ориентируясь на современную технологическую концепцию выплавки жидкого полупродукта в трехфазных 50 и 100-т дуговых электропечах с последующей его доводкой в сталеразливочном ковше на участке внепечной обработки.

Практика применения разработанных на сегодняшний день технологических вариантов выплавки и внепечной обработки обеспечивает требуемую чистоту стали и оптимальную подготовку металлического расплава к кристаллизации (табл.1).

Таблица 1 - Современный уровень требований, предъявляемый к качеству электростали для производства крупного слитка

Показатели	Единица измерения	Значения
S	%	До 0,003-0,005
P	%	До 0,010-0,020
[H]	ppm	≤ 1,5
[O]	ppm	≤ 25
[N]	ppm	≤ 60
А-сульфиды	Баллы по ASTM E45	Не более 2*
В-алюминаты	Баллы по ASTM E45	Не более 2
С-силикаты	Баллы по ASTM E45	Не более 2
Д-оксиды	Баллы по ASTM E45	Не более 2

* Требование по неметаллическим включениям при использовании качественной сифонной проводки (Al_2O_3 не менее 60%)

В мировой практике такой технологический подход является общепринятым, так как обладает рядом существенных преимуществ и

позволяет гибко и мобильно проводить технологические операции, способствует энерго- и ресурсосбережению, а при определенных условиях позволяет существенно повысить производительность сталеплавильного агрегата.

Предлагаемая общая схема сквозной технологии выплавки и внепечной обработки в условиях ЭСПЦ ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» заключается в следующем:

- выплавка углеродистого полупродукта в ДСП, включающая расплавление шихтовых материалов, дефосфорацию металла, его нагрев до температуры выпуска и скачивание печного шлака из печи путем наклона ванны и вручную скребками;
- выпуск полупродукта в сталеразливочный ковш с подачей в последний раскислителей, легирующих и шлакообразующих материалов при непрерывном пневматическом перемешивании стали с помощью продувочных элементов, установленных в днище ковша;
- дуговой нагрев на трехфазной переменной тока установке печь-ковш с целью наведения высокоосновного раскисленного рафинировочного шлака для десульфурации стали, компенсации потерь тепла при обработке и перегрева расплава перед вакуумированием;
- непрерывное или импульсное пневматическое перемешивание расплава в ходе проведения всех технологических операций внепечной обработки с целью обеспечения нагрева стали и интенсификации массообменных процессов в ходе десульфурации, диффузионного и осадочно-го раскисления, а также науглероживания и легирования;
- подача в металл реагентов в виде порошковой проволоки с помощью трайбаппаратов для прецизионной обработки стали;
- вдувание под шлак порошкообразных материалов в струе газа через неохлаждаемую расходую фурму для корректировки содержания углерода;
- вакуумная обработка раскисленного металла в вакууматоре камерного типа с возможностью дополнительного легирования и корректировки химического состава под вакуумом;
- возможность организации вакуум-кислородного обезуглероживания.

Принцип выбора и последовательности проведения всех операций внепечной обработки для условий ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» можно сформулировать следующим образом:

- проанализированы разнообразные технологические варианты внепечной обработки, применяемые в современной металлургии;
- отдано предпочтение тем технологическим вариантам, которые показали свою эффективность достаточно освоены, исследованы и внедре-

ны, так как применение испытанной технологической схемы позволяет ограничить риск потерь в период освоения и эксплуатации оборудования.

Известно, что вакуумированный металл в сравнении с невакуумированным при равном содержании серы имеет более высокую долю сульфидных включений. Это объясняется, прежде всего, более низким содержанием оксидных включений в вакуумированной стали, в результате чего сульфидные включения в меньшей степени откладываются на оксидах и выделяются в отдельную фазу в более грубой форме. Проблема сульфидных включений в вакуумируемой стали решается тем, что в металле необходимо иметь достаточно низкую концентрацию серы.

Для процесса десульфурации, который протекает в диффузионной области, скорость взаимодействия ограничена массообменом веществ в объеме металла или шлака. На основании вышеизложенного следует, что самой «медленной» технологической операцией, которая ограничивает производительность участка внепечной обработки, как правило, является процесс десульфурации стали. Действительно, при скорости десульфурации, 3-5 ppm/мин (для стали с начальным содержанием серы около 0,025 %) десульфурация на 0,015 - 0,020 % занимает примерно 40 - 60 мин. Учитывая, что максимальная скорость подъема температуры металла в агрегате «печь-ковш» составляет около 4 °С/мин, за время десульфурации при работе с включенным трансформатором можно повысить температуру стали в ковше на 160 - 240 °С. То есть, вполне очевидна диспропорция для установки «ковш-печь» между скоростью нагрева металла и десульфурации.

На практике нагрев металла в течение цикла обработки на установке «ковш-печь» (30-35 мин) гарантированно обеспечивается получение заданного перегрева расплава. Дальнейшее нахождение металла на установке, часто связано с необходимостью получения требуемого содержания серы в стали. Как показывает практика, при параллельном проведении операций десульфурации и нагрева на установке «ковш-печь» степень использования трансформатора составляет около 50 %, что влечет за собой повышение расходов по переделу и снижению производительности.

Поэтому применительно к условиям электросталеплавильного цеха ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» разработана технология непрерывной десульфурации, реализация которой начинается сразу после наведения шлака на установке «ковш-печь» и заканчивается по окончании вакуумирования, включая продувку металла в ковше инертным газом в позиции ожидания. Данное мероприятие позволяет сократить продолжительность пребывания металла в ковше, повысить степень использования трансфор-

матора и сократить потери тепла.

Завершающий этап десульфурации стали, который проводят в камерном вакууматоре позволяет достичь чрезвычайно низкого содержания серы (до 0,001 %), а за счет интенсивного перемешивания металла со шлаком без доступа воздуха предупредить опасность поглощения азота и окисления расплава в ходе обработки, что существенно повышает результат рафинирования.

В ходе выполнения работы были определены основные технологические параметры, обеспечивающие заданное качество продукции и производительность. Так, в табл. 2 представлен график проведения операций внепечной обработки на установке «ковш-печь».

Таблица 2 – График проведения операций внепечной обработки на установке «ковш-печь»

№	Наименование операции	Продолжительность, мин
0	Операции раскисления и легирования, науглероживания (частично или полностью) проводятся в сталеразливочном ковше во время выпуска плавки	
1	Передача ковша на сталевоз в исходном положении	5
2	Передача ковша сталевозом в рабочую позицию.	2
3	Включение дугового нагрева при непрерывном перемешивании, подача шлакообразующих.	10
4	Отбор пробы стали (1), замер температуры (1).	3
5	Нагрев металла, раскисление шлака. Проведение десульфурации. Корректировка состава стали: по марганцу и кремнию, хрому, никелю и пр. Корректировка состава шлака, добавка шлакообразующих.	15
6	Отбор пробы (2). Замер температуры (2).	3
7	Нагрев стали, корректировка температуры. Корректировка содержания углерода и легирующих. Раскисление алюминием и силикокальцием (трайбаппарат).	8
8	Отбор пробы (3). Замер температуры (3). Получение результата химического анализа.	6
9	Вспомогательные операции. Выдача ковша сталевозом на исходную позицию.	2
	Всего:	54

Снижение содержания водорода в стали до необходимого предела – основная цель вакуумирования стали для производства крупного слитка. Для ее достижения выбран путь вакуумирования раскисленной стали в сталеразливочном ковше непосредственно перед разливкой в слитки с применением способов принудительного перемешивания для усиления массообмена между металлом и газовой фазой.

При вакуумировании стали в ковше с одновременной продувкой аргоном динамика дегазации с достаточной точностью описывается кинетическим уравнением реакции первого порядка относительно концентрации растворенного в металле газа

$$C = C_0 * \exp(-k\tau), \quad (1)$$

где C – конечное содержание газа в металле после, C_0 – до обработки.

При этом результаты многочисленных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что численное значение константы скорости реакции (k) определяется величиной мощности перемешивания расплава.

На основании многочисленных промышленных экспериментов в мартеновских цехах АО «НКМЗ» и ОАО «ВМЗ», установлено, что достаточная величина скорости удаления водорода достигается при удельной мощности перемешивания металла 200 Вт/т и выше.

К сожалению, при атмосферном давлении такая величина мощности перемешивания практически недостижима.

Для расчета величины мощности пневматического перемешивания (ϵ , Вт) стали в ковше пользовались следующей общеизвестной зависимостью:

$$\epsilon = 6,18V_G T_L \ln \left(1 + \frac{\rho_L g H_0}{103000 P_0} \right), \quad (2)$$

- где
- объемный расход инертного газа, м³/мин;
 - температура жидкой стали, К;
 - плотность металла, кг/м³;
 - ускорение свободного падения, м/с²;
 - глубина ввода газа в металл, м;
 - давление над поверхностью расплава, атм.

Оценку величины мощности перемешивания раскисленной стали в ковше под вакуумом для условий электросталеплавильного цеха ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» проводили с учетом геометрических параметров для двух типов ковшей.

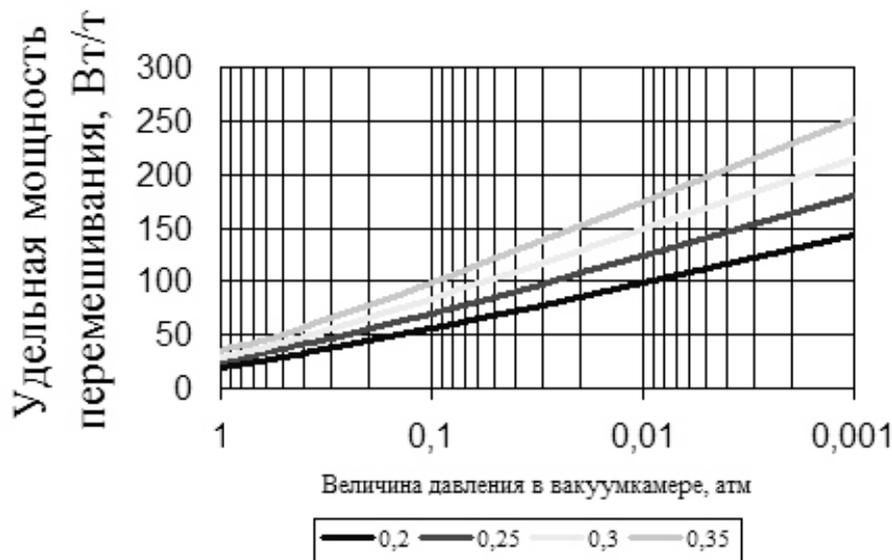
1. Ковш 130 т

Масса плавки, кг	120000
Плотность стали, кг/м ³	7000
Объем металла в ковше, м ³	17,14
Высота металла в ковше, м	2,60
Температура стали, К	1873
Глубина ввода газа в металл, м	2,60

2. Ковш 75 т

Масса плавки, кг	60000
Плотность стали, кг/м ³	7000
Объем металла в ковше, м ³	8,57
Высота металла в ковше, м	1,95
Температура стали, К	1873
Глубина ввода газа в металл, м	1,95

Результаты расчета мощности перемешивания от расхода вдуваемого газа и давления в вакуум камере представлены на рис.1 и 2. Из представленных данных следует, что под вакуумом достижим принципиально новый количественный результат пневматического перемешивания металла, так как величина мощности перемешивания при снижении давления до практически достижимых в вакуумной камере значений увеличивает мощность перемешивания в десять раз.



Інтенсивність продувки розплаву інертним газом, м³/мін

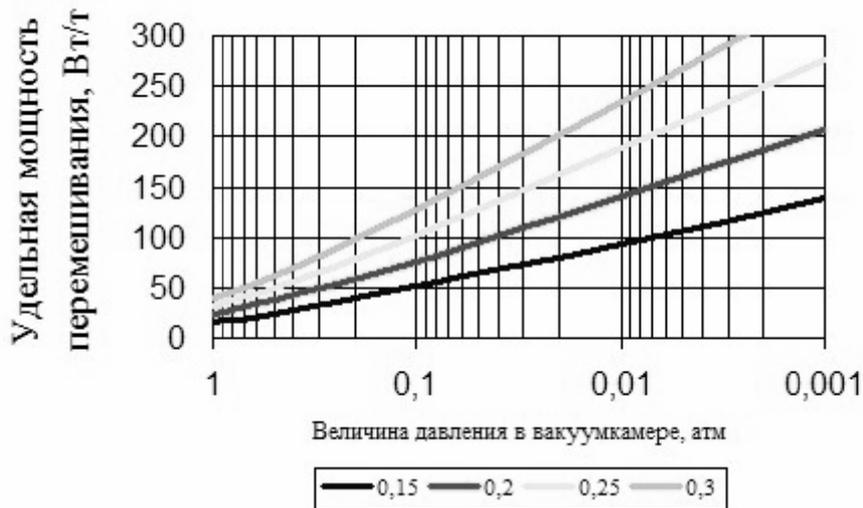
Рисунок 1 – Залежність потужності пневматического перемешивания 120 т розплаву в ковше від расхода інертного газу і тиску в вакуум камере

Из расчета (рис.1) следует, что при средней интенсивности ввода инертного газа в расплав под вакуумом от 0,30 до 0,35 м³/мин необходимый эффект (мощность перемешивания более 200 кВт/т) может быть достигнут при давлении в вакуумкамере ниже, чем 0,002 и 0,004 атм. соответственно.

Очевидно, что при более глубоком вакууме необходимая для эффек-

тивной дегазации величина мощности перемешивания практически достижима при расходе инертного газа $0,25 \text{ м}^3/\text{мин}$. Таким образом, учитывая наличие двух продувочных пробок в днище 130-т сталеразливочного ковша средняя интенсивность продувки под вакуумом должна составить около $0,13 - 0,15 \text{ м}^3/\text{мин}$ на одну пробку.

Результат аналогичной оценки соответствующего параметра для 75-т сталеразливочного ковша (рис.2) показал, что при средней интенсивности ввода инертного газа в расплав под вакуумом $0,18 \text{ м}^3/\text{мин}$ необходимый эффект (мощность перемешивания более 200 кВт/т) может быть достигнут при давлении в вакуумкамере не выше, чем $0,001 \text{ атм}$. Таким образом, учитывая наличие двух продувочных пробок в днище 75-т сталеразливочного ковша средняя интенсивность продувки под вакуумом должна составить $0,09-0,10 \text{ м}^3/\text{мин}$ на одну пробку.



Интенсивность продувки расплава инертным газом, $\text{м}^3/\text{мин}$

Рисунок 2 – Зависимость мощности пневматического перемешивания 60 т расплава в ковше от расхода инертного газа и давления в вакуум камере

Как показывает практика вакуумирования, в обоих случаях при обеспечении достаточной высоты свободного борта сталеразливочного ковша величина интенсивности продувки инертным газом приемлема для условий разрабатываемой технологии.

Для оценки расхода нейтрального газа на дегазацию стали под вакуумом принято применять формулу Геллера. При выводе этой зависимости сделано допущение, согласно которому за время пребывания пузырей в расплаве распределение водорода между металлом и газовой фазой достигает состояния равновесия, а зависимость между концентрацией газа в ста-

ли и парциальным давлением его в удаляющихся из расплава пузырьках описывается уравнением Сивертса:

$$[H] = K_H * \sqrt{P_{H_2}} \quad (3)$$

Приведенная зависимость позволяет теоретически оценить минимально необходимый расход нейтрального газа для дегазации стали.

В реальных процессах за время пребывания пузырей в металле состояние равновесия, как правило, не достигается, поэтому необходимое для дегазации стали количество нейтрального газа корректируется в сторону увеличения за счет применения эмпирических коэффициентов и поправок.

Ниже приведена известная формула Геллера для случая, когда продувка проводится с целью удаления из металла водорода.

$$V_{Ar} = \frac{224}{M_{H_2}} \left[PK_H^2 \left(\frac{1}{[H]} - \frac{1}{[H]_0} \right) + ([H]_0 - [H]) \right], \quad (4)$$

где V_{Ar} – объем продуваемого через металл аргона, м³/т;

$[H]_0$ – исходная концентрация водорода в стали, %;

$[H]$ – конечная концентрация водорода в стали, %;

M_{H_2} – относительная молекулярная масса удаляемого газа;

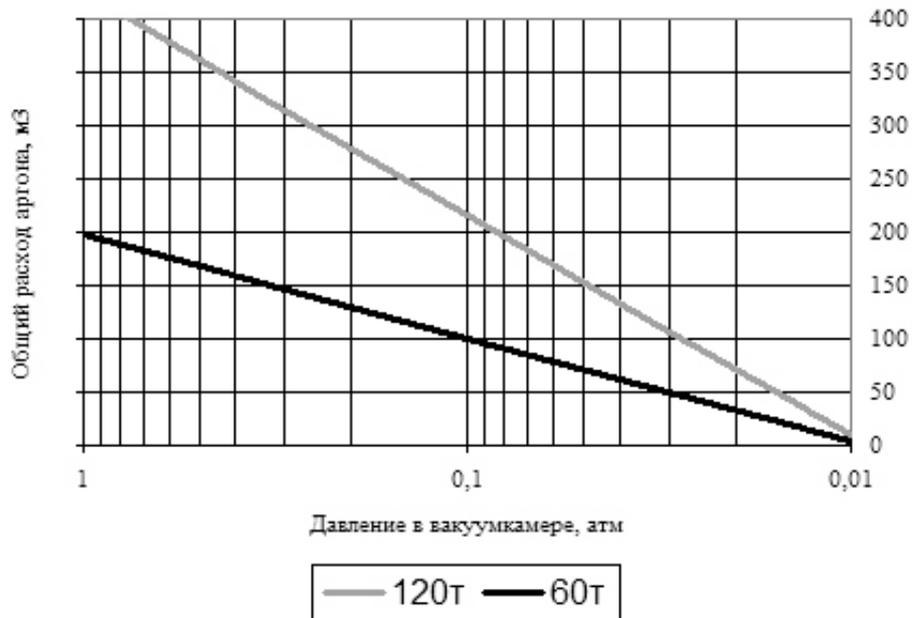
P – общее давление в удаляющейся из металла смеси газов (состоит из суммы парциальных давлений водорода P_{H_2} и аргона P_{Ar});

K_H – константа равновесия реакции.

Анализ уравнения (4) показывает, что необходимый для дегазации стали расход аргона быстро уменьшается при понижении давления над поверхностью расплава. В связи с этим сочетание продувки стали инертным газом и вакуумной обработки является весьма эффективным средством дегазации металла.

Результаты расчета количества аргона, проведенного согласно зависимости (4), необходимого для дегазации металла показаны на рис. 3.

Практика вакуумирования подтверждает, что для заданной степени дегазации расход аргона уменьшается при падении давления над металлом.



Масса стали в ковше

Рисунок 3 – Общій расход аргона на 120 и 60 т расплава в ковшах для снижения содержания водорода в раскисленной стали с 6 до 1,5 см³/100 г

Анализ приведенных на рисунке 3 данных показывает, что для снижения в стали содержания водорода с 6 до 1,5 см³/100 г под атмосферным давлением необходимо ввести в 130 т сталеразливочный ковш более 400, а в 75 т около 200 м³ инертного газа. При продувке инертным газом под вакуумом (0,001 атм) количество газа значительно снижается и составляет 6,5 и 3,2 м³, при этом удельный расход аргона должен составить 0,30-0,35 и 0,18-0,20 м³/мин для 130 т и 75 т ковшей соответственно.

На основании полученных величин оптимизированы следующие параметры:

- продолжительность продувки стали в ковше под вакуумом;
- снижение температуры стали в результате обработки под вакуумом (без учета вводимых ферросплавов и шлакообразующих);
- кондиции покровного шлака и потенциальные возможности удаления серы под вакуумом.

Оценка показывает, что для снижения в стали содержания водорода с 6 до 1,5 см³/100г продолжительность продувки стали в ковше под вакуумом должна составлять:

для 130 т ковша:

$$6,47 \text{ м}^3 / 0,35 \text{ м}^3/\text{мин} = 18,5 \text{ мин}$$

для 75 т ковша:

$$3,23 \text{ м}^3 / 0,20 \text{ м}^3/\text{мин} = 16,2 \text{ мин.}$$

При этом следует учитывать, что ростом интенсивности продувки инертным газом под вакуумом остаточное давление в камере может увеличиться, поэтому, несмотря на усиление перемешивания, степень удаления водорода может снижаться. Вследствие этого необходимо соизмерять интенсивность продувки аргоном под вакуумом с производительностью вакуумных насосов.

Для оценки величины температуры стали перед вакуумированием оценим снижение температуры стали по ходу проведения всех технологических операций на вакууматоре.

В табл. 3 представлена величина продолжительности операций на вакууматоре.

В табл. 4 на основании математического моделирования приведены данные по снижению температуры стали в ковшах на различных стадиях технологического процесса.

Применяя данные вышеприведенных таблиц, оцениваем потери температуры в период вакуумирования:

- ковш 130 т – 47,7 °С;
- ковш 75 т – 60,5 °С.

Разработанная для реализации в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» совокупность технологических операций внепечной обработки позволяет реализовать металлургические гарантии, так как на практике показала свою надежность и эффективность и нашла свое техническое и технологическое воплощение в прошедших широкую промышленную проверку разработках ОАО «НКМЗ», в том числе при промышленной эксплуатации установок «ковш-печь» и VD.

Надеемся, что модернизация электросталеплавильного цеха на базе современной технологии и оборудования внепечной обработки стали позволит ОАО «ЭМСС» освоить выпуск металлопродукции с высокой добавленной стоимостью, которая отвечает современным мировым требованиям.

Таблица 3 – График проведения операций внепечной обработки на установке камерного вакуумирования

Наименование операции	Продолжительность операции, мин	
	130 т	75 т
Передача ковша разливочным краном в вакуум камеру	3	3
Вспомогательные операции Опускание ковша в камеру вакууматора	2	2
Замер температуры (1) Снижение давления до величины остаточного давления не менее 0,5-1 мм.рт.ст.	7	6
Собственно вакуумирование Отбор пробы под вакуумом (2) Замер температуры под вакуумом (2)	19	17
Разгерметизация вакуум камеры	2	2
Подъем крышки вакуум-камеры	2	2
Подача ковша на разливку. Вспомогательные операции	6	6
Всего:	41	38

Таблица 4 – Результаты расчета потерь температуры при проведении операций внепечной обработки на установке камерного вакуумирования

Наименование операции	Скорость снижения температуры, °С/мин	
	130 т	75 т
Ожидание и перестановки ковша: без защиты зеркала расплава защитой зеркала различными средствами	0,4 0,2	0,6 0,3
Усреднение металла путем продувки инертным газом	1,0	1,4
Продувка инертным газом под вакуумом	1,7	2,3

© Сафонов В.М., Ковалев А.Г., Волков С.Ю. 2007