

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Показатели	
13	Производительность	кг/ч	390...610	
14	Топливосжигающие устройства	ГРС-150	шт.	4

Продукты сгорания удаляются через встроенные в горелки рекуператоры в сборный металлический, теплоизолированный дымопровод.

Свод печи и торцевые стены футерованы волокнистыми огнеупорными материалами, что способствует уменьшению потерь тепла теплопроводностью через футеровку печи в окружающую среду. Нижнее строение футеровано огнеупорным кирпичом.

Таким образом, разработанная конструкция печи позволяет экономить топливо, и занимать относительно небольшое место в цехе. Предложенная конструкция и способ транспортировки изделий в рабочем пространстве печи могут быть использованы для термообработки прутков, труб, полосы, а также сортового проката различной формы.

УДК 66.094.3

*А. А. Чернов, Н. Б. Лошкарев, Г. М. Дружинин*

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ УГАРА В СТАЛИ ПРИ НАГРЕВЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ**

### **Аннотация**

*В данной работе рассмотрены вопросы окалина образования и обезуглероживания металлов в черной и цветной металлургии. Приведен анализ физическо-химических процессов. Изучены способы защиты металлов от окисления и обезуглероживания при нагреве в различных теплотехнических агрегатах. Указаны направления поиска решения по снижению негативного воздействия на обозначенные процессы в статье.*

*Ключевые слова: окалина, обезуглероживание, термообработка металла, нагрев, металлургические печи, мало окислительная атмосфера, защитные покрытия.*

### **Abstract**

*In this work questions are considered of education calx and decarbonization of metals in ferrous and in non-ferrous metallurgy. The analysis of the physical and chemical processes. Ways of protection of metals are studied against oxidation and decarbonization when heating in various furnaces. The directions of search of the decision on decrease in negative impact on specified processes in article are specified.*

*Keywords: calx, decarbonization, metal heat treatment, heating, metallurgical furnace, little oxidizing atmosphere, sheetings.*

Нагрев металла под ковку и горячую штамповку сопровождается рядом отрицательных явлений, таких как: угар, обезуглероживание, перегрев, пережог, образование окалины и т. д. Эти все явления не выгодны с точки зрения экономики и пагубно влияют на оборудование при последующей обработке металла. Например, обезуглероживание поверхностных слоев стальных изделий приводит к снижению твердости, уменьшению сопротивления циклическим нагрузкам и ухудшению режущих способностей инструмента. Удаление обезуглероженного слоя в уже готовых изделиях путем сплошной зачистки и шлифовки приводит к физическим потерям металла и увеличению себестоимости продукции. Образование окалины

при нагреве приводит к большим потерям металла, ухудшению качества поверхности, снижению стойкости подина, затрудняет обслуживание печей, увеличивает степень износа валков и штампов, препятствует внедрению таких эффективных и экономичных процессов, как непрерывная прокатка и точная штамповка. В связи с этим необходимо снизить воздействие на металл все те процессы, которые были выше упомянуты.

В общем случае под окислением стали понимают процесс взаимодействия газов (воздуха, продуктов сгорания топлива или контролируемой атмосферы) с железом, сопровождающийся образованием слоя оксидов на поверхности металла. Окисление металлов и сплавов определяется многими факторами, к важнейшим из которых можно отнести состав и скорость газовой фазы, температуру и продолжительность взаимодействия, состав стали и структуру окалина. Применительно к нагреву стали в пламенных печах перед обработкой давлением основными окислительными газами являются: углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), кислород ( $\text{O}_2$ ), водяной пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ).

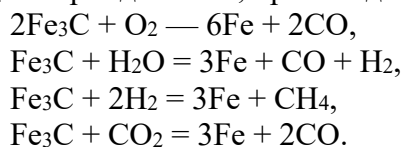
При температурах более  $570^\circ\text{C}$  окалина, образующаяся на стали, состоит из трех слоев: вюстита ( $\text{FeO}$ ), магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). При окислении в области температур менее  $570^\circ\text{C}$  слой вюстита отсутствует. Высокотемпературное окисление – процесс встречной реакционной диффузии атомов кислорода и металла через кристаллические решетки твердых фаз, из которых состоит окалина. Его можно разделить на несколько этапов:

- диффузия кислорода к поверхности металла;
- адсорбция кислорода на поверхности;
- диффузия реагирующих веществ через слой оксидов навстречу кислороду;
- кристаллохимические превращения как следствие изменения состава и структуры решетки твердых фаз [1].

Решающую роль при этом играет диффузия атомов железа наружу, а не процесс диффузии атомов кислорода внутрь металла.

Обезуглероживание стали зависит от химического состава атмосферы и стали, температуры и продолжительности процесса, режима нагрева и охлаждения.

Обезуглероживание – процесс взаимодействия углерода, содержащегося в стали, с газовой атмосферой, сопровождающийся уменьшением концентрации углерода в поверхностных слоях слитков заготовок или металлоизделий. Основными обезуглероживающими газами являются: кислород, водяной пар, водород, углекислый газ. Обезуглероживание стали, содержащей карбид железа, происходит по следующим основным реакциям:



Науглероживание - процесс взаимодействия стали с газовой атмосферой, сопровождающийся увеличением концентрации углерода в поверхностных слоях слитков заготовок или металлоизделий. Науглероживающими газами являются монооксид углерода ( $\text{CO}$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), а также другие углеводороды.

Обезлегиrowание – процесс взаимодействия газовой атмосферы с легирующими элементами стали ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{W}$  и др.), сопровождающийся уменьшением их концентрации в поверхностных слоях слитков заготовок или металлоизделий. Образующиеся при этом соединения легирующих элементов (в основном оксиды) переходят в окалину. Поскольку скорости окисления железа и легирующих элементов стали могут существенно различаться, то в общем случае может происходить не только обеднение поверхностных слоев легирующими, но и обогащение т.е. увеличение их концентрации.

Угар – потери массы металла после нагрева, т.е. фактически включает потери массы от окисления железа, легирующих элементов и углерода.

Окалина – продукты реакции взаимодействия стали с атмосферой. Окалину могут подразделять на:

- печную (первичную), образовавшуюся в печном агрегате (нагревательном колодце, методической печи и др.);

– воздушную и прокатную (вторичную), образовавшуюся при транспортировании металла от печи к стану, при прокатке стали в валках и охлаждении после нее [1].

Желание использовать пламенные печи прямого и косвенного нагрева вместо электрических обусловлено более низкой себестоимостью тепловой обработки в пламенных печах. Однако, производство деформируемых титановых полуфабрикатов с использованием известных пламенных печей прямого нагрева требует значительного увеличения припусков на механическую обработку и затрат на контроль содержания водорода вблизи поверхности и по сечению термически обрабатываемого изделия. Превышение концентрации водорода над максимально и безопасно допустимыми значениями приводит к снижению ударной вязкости, повышению склонности металла к замедленному разрушению. Для удаления излишков водорода из металла используется длительный вакуумный отжиг, что приводит к значительному удорожанию готовой продукции.

В пламенных печах помимо состава печной атмосферы на величину угара влияют также условия переноса тепла теплоносителем к нагреваемым заготовкам. Высокоинтенсивные процессы теплообмена позволяют существенно сократить продолжительность нагрева, а, следовательно, и величину окисления и обезуглероживания [3].

Для снижения угара металла и уменьшения обезуглероживания сталей предложен и используется способ тепловой обработки (нагрева) стали в пламенных печах прямого нагрева, основанный на сжигании смеси газообразного топлива и воздуха, при котором топливо сжигают с коэффициентом избытка воздуха, меньшим единицы (так называемый безокислительный или малоокислительный нагрев).

Недостатком малоокислительного нагрева является повышение в продуктах сгорания содержания угарного газа (СО) вследствие неполного сгорания топлива. Это вызывает необходимость герметизации всей конструкции пламенной печи, обеспечение газоплотности футеровки стен, свода печи и отводных каналов, а также создание устройств дожигания продуктов сгорания, что приводит к существенным капитальным затратам и перерасходу топлива [2].

Известен также способ тепловой обработки металла в пламенной печи косвенного нагрева, при котором производят отделение продуктов сгорания от нагреваемого металла, в частности, используют муфелирование пламени – сжигание смеси топлива и воздуха в отапливаемом пространстве внутри радиационной трубы (муфеля), а нагрев металла в рабочем пространстве вне радиационной трубы производят путем излучения от внешних стенок нагретой изнутри радиационной трубы.

Способ тепловой обработки металла в пламенной печи прямого или косвенного нагрева, основанный на сжигании смеси жидкого или газообразного топлива и нагретого воздуха при определенном значении коэффициента избытка воздуха, отличается тем, что сжигание указанной смеси топлива и воздуха производят при значении коэффициента избытка воздуха, превышающем значение 2,0 и устанавливаемом преимущественно в диапазоне до 6,0 [2].

При тепловой обработке металлических и неметаллических изделий в пламенных печах прямого или косвенного нагрева с коэффициентом избытка воздуха, большим 2,0, имеет место подача в отапливаемое пространство печи или в радиационную трубу увеличенных объемов воздуха. При этом за счет повышения скорости перемещения продуктов сгорания в отапливаемом пространстве печи и в радиационной трубе увеличивается конвективная составляющая теплообмена. Это обуславливает сокращение времени передачи тепла от продуктов сгорания к обрабатываемой в пламенной печи продукции и увеличение производительности печи. Сокращение времени нагрева обеспечивает дополнительное снижение угара, обезуглероживания и наводороживания нагреваемых металлов [2].

Еще один способ защиты стальных заготовок в прокатке и термической обработке, может быть решен с применением специальных печей. В настоящее время имеются вакуумные печи и печи с нейтральной атмосферой. Однако они пригодны для нагрева и термообработки только мелких заготовок из-за малого объема рабочего пространства. Помимо сравнительно высокой стоимости указанные печи промышленностью выпускаются в ограниченном количестве. Обработка заготовок в вакуумных печах существенно усложняет технологический

процесс, в 2–5 раз увеличивается время термообработки из-за необходимости создания вакуума в печном пространстве и охлаждения готовой продукции в вакууме [3].

Известно техническое решение, заключающееся в нанесении на поверхности стальных заготовок перед нагревом защитных покрытий, состоящих из силикатного стекла. Благодаря своей легкоплавкости подобные покрытия образуют на поверхности стальных заготовок сплошную пленку, препятствующую непосредственному контакту с окислительной атмосферой печи. Однако благодаря сравнительно низкой температуре плавления силикатных стекол достигается за счет введения в их состав весьма значительных (до 25 %) количеств оксидов щелочных металлов - натрия и калия. Для расплавов, содержащих такие компоненты, характерны высокие значения коэффициента диффузии кислорода из печной атмосферы к поверхности защищаемого металла. Кроме того, возможно и непосредственное растворение металла в расплаве, что говорит о нецелесообразности применения силикатных стекол для защиты стальных заготовок при температурах более 1000 °С [4].

Существует техническое решение, предназначенное для обеспечения кратковременной защиты стальных заготовок, включает в себя средства перемешивания порошка (на основе  $Al_2O_3-SiO_2$ ) с водой для получения суспензии и подачи её под давлением в систему разбрызгивающих форсунок, укрепленных внутри прямоугольных (круглых) рамок, которые установлены в линии загрузочного рольганга перед входом в нагревательную печь (рис. 1).

Для обеспечения улучшенной кроющей способности и быстрой сушки нанесённого кратковременного технологического защитного покрытия поверхность стальной заготовки должна быть горячей. Это позволит сразу же после нанесения защитного покрытия отправить стальную заготовку для нагрева в печь перед обработкой давлением [3].

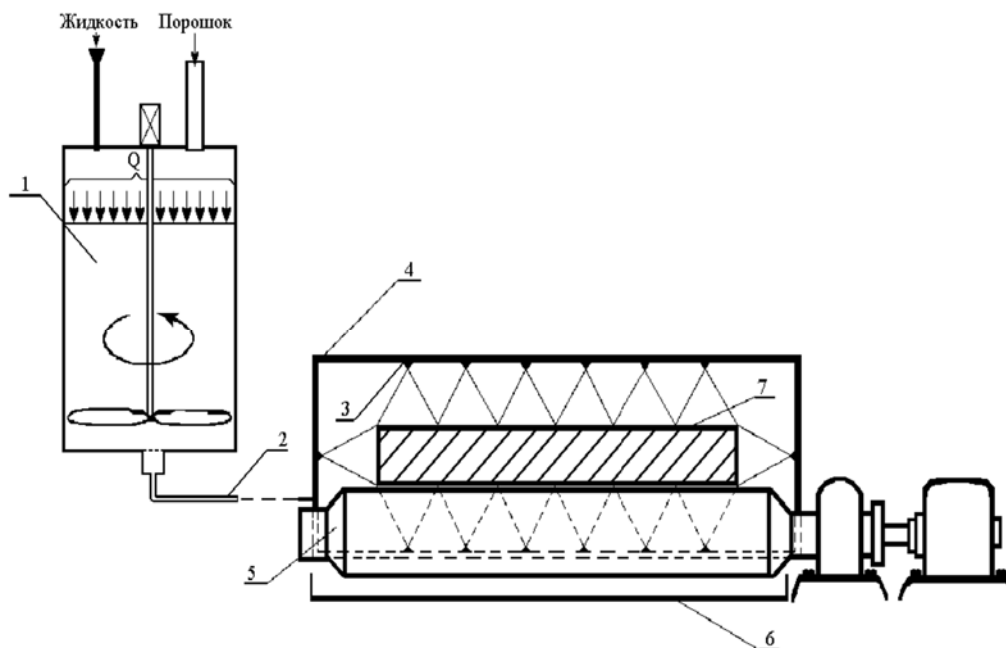


Рис. 1. Схема установки для нанесения защитного покрытия:

- 1 – ёмкость для получения суспензии; 2 – трубопровод для подачи суспензии к форсункам;
- 3 – разбрызгивающие форсунки; 4 – рамка с форсунками; 5 – транспортирующий рольганг;
- 6 – поддон для сбора излишков покрытия; 7 – стальная заготовка

#### Список использованных источников

1. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
2. Патент РФ № 2324745. Способ тепловой обработки металла в пламенной печи прямого или косвенного нагрева (варианты), способ сжигания смеси жидкого или газообразного топлива и нагретого воздуха в пламенной печи прямого или косвенного нагрева, устройство

отопления (варианты) и регенеративная насадка (варианты) для осуществления способов. – Введ. 26.02.2006. Дистергефт И.Г., Дистергефт И.И. – Екатеринбург, 2008. – 76 с.

3. Куклев А.В., Разработка технологии снижения поверхностного окисления и обезуглероживания стальных заготовок при нагреве с применением кратковременных технологических защитных покрытий: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.16.02 / А.В. Куклев; ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И.П. Бардина». – Москва, 2014. – 158 с.

4. Патент РФ № 2571032. Способ защиты стальных заготовок от окисления при нагреве перед обработкой давлением. – Введ. 20.12.2014 – Москва: ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет» «МИСиС», 2015. – 3 с.

УДК 621

*Е. Л. Швыдкий, К. Е. Болотин, И. А. Смольянов, Ф. Е. Тарасов, С. А. Бычков*  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ**

Применение технологии электромагнитного перемешивания в металлургии имеет большой потенциал. В черной металлургии применение электромагнитных перемешивателей для дуговых печей демонстрируют очевидные преимущества для клиентов в энерго-, ресурсосбережении и выходе годного [1]. В машинах непрерывного литья оснащенных электромагнитными перемешивателями достигается повышение качества литых заготовок [2]. В цветной металлургии на стадии приготовления расплава в миксерах [3] и отливки [4] применение технологии электромагнитного перемешивания позволяет повысить производительность технологического процесса и качество отливаемых полуфабрикатов и изделий, оснащенных электромагнитным перемешивателем, производительность значительно возрастает.

Помимо применения в металлургии в последнее время широкое распространение получила технология производства композитных материалов [5] с использованием электромагнитного перемешивания, а также выращивание полупроводниковых кристаллов под воздействием электромагнитного поля [6].

Широкое применение данной технологии объясняется такими преимуществами как, бесконтактное воздействие, легкость в управлении и модульность. Однако для каждой технологической задачи необходимо разрабатывать уникальный перемешиватель. В связи с вышеперечисленным возникает потребность в разработке индукторов различных конструкций и характеристик, которые будут способны развивать перемешивания требуемой интенсивности и характера.

Поскольку жидкие металлы являются непрозрачной жидкостью, а электропроводность электролизов очень мала инструмент численного моделирования является наиболее выгодным для исследований в области магнитной гидродинамики [7]. В данной работе представлена модель электромагнитного перемешивается жидкого алюминия.

Геометрия модели состоит электромагнитного перемешивателя с расплавом показанными на рис. 1. Проводники индуктора подключены к трехфазному источнику переменного тока и генерируют вращающее магнитное поле. Магнитное поле через магнитопровод и вставки проникает в расплавленный металл. Расплавленный алюминий обладает хорошей электропроводностью (около 3 МСм/м) и находясь под воздействием переменного магнитного поля в нем индуцируется вихревой ток. Поскольку магнитное поле проникает с низу емкости с металлом, электрический ток возникает преимущественно на нижней поверхности, экспоненциально затухая. Взаимодействие магнитного поля, создаваемого вихревыми тока-