# 2 Теоретическое обоснование механизма направленного воздействия на процесс формирования поверхностного слоя отливок

Анализ технической литературы показывает, что к настоящему времени известны немногочисленные работы, где описываются в основном результаты практической реализации процессов направленного формирования поверхностного слоя путем поверхностного легиро­вания отливок для решения конкретных производственных задач. Недостаточно разработаны теоретические основы механизма воздействия на поверхностный слой отливки в процессе формиро­вания последней.

Исследование и обоснование возможности воздействия на поверхностный слой отливок в процессе их формирования активным взаимодействием металла и формовочных материалов целесообразно начать с разработки теоретической модели процесса направленного легирования отливки. В модели процесса нужно отразить необходимые и достаточные условия для направленного осуществле­ния рассматриваемого процесса.

После этого необходимо перейти к сравнению реальных про­цессов формирования отливок с теоретическими, и теоретическо­му обоснованию возможности направленного воздействия на по­верхностный слой отливок в процессе их формирования.

## 2.1 Расчет параметров процесса поверхностного легирования

Для расчета введем следующие допущения: при контакте жидкого металла с легирующим покрытием температура на поверх­ности покрытия достигает своего предельного значения практи­чески мгновенно; легирующий компонент покрытия в условиях контакта имеет определенную эффективную температуру легирова­ния tл покрытия, содержащие несколько различных легирую­щих элементов, также имеют определенную tл, начало процесса перехода легирующих элементов в металл совпадает с моментом установления контакта формы с металлом. Этот процесс проте­кает при определенной температуре в равновесных условиях покрытие не изменяет легирующих свойств в процессе контакта.

Расчет параметров процесса легирования необходимо прово­дить исходя из толщины легированного слоя отливки, требуемого получить в процессе литья. В этом случае можно записать:

Qm = K Qn (19)

где:

Qm количество легирующих элементов в поверхностном слое отливки, кг;

- количество легирующих элементов в покрытии, кг;

- коэффициент потерь легирующих элементов в процессе перехода из покрытия в металл.

Определим по формуле:

(20)

Где:

- объем легированного слоя, определяемый из геометрических соображений, м3;

- удельное содержание легирующих элементов, %;

- плотность, кг/м3;

Исходя из принятых допущений количество легирующих элемен­тов переходящих из покрытия, будет равно:

(21)

где:

- объем покрытия, находящийся в контакте c металлом, м3;

- плотность легирующих элементов покрытия, кг/м3;

*N* - удельное содержание легирующих элементов в покрытии, %;

Раскрывая, получим:

(22)

где:

S - площадь поверхности контакта металла с покрытием,м2;

H - толщина покрытия, м;

Тогда можно записать с учетом (4)

(23)

Необходимо стремиться, чтобы покрытие полностью участвовало в работе поверхностного легирования.

В работе [57] в качестве критерия для оценки процессов получения биметаллических отливок принята температу­ра контактной поверхности, которая определяется в основном теплофизическими свойствами металла и является функцией тем­пературы предварительного нагрева металла основы, температуры жидкого металла, отношения массы жидкого металла и контактной поверхности и отношения масс жидкого металла и металла основы.

Тогда, с учетом этого и эффективной температуры поверх­ностного легирования максимально возможную толщину покрытия можно определить согласно [56] по формуле:

(24)

*n* - показатель степени кривой, описывающей температурное поле формы, h ≈ 2,8; 3,0; 3,2 соответственно для алюминия, серого чугуна и стали;

a - коэффициент температуропроводности покрытия;

tл- эффективная температура поверхностного легирования, °С;

t0 - начальная температура покрытия, °С;

tn - температура покрытия на поверхности контакта с металлом, °С

τ - время проникновения металла в поры и расплавления покрытия, с.

Предварительный анализ показывает, что толщина покрытия особенно будет зависеть от tл и tn.

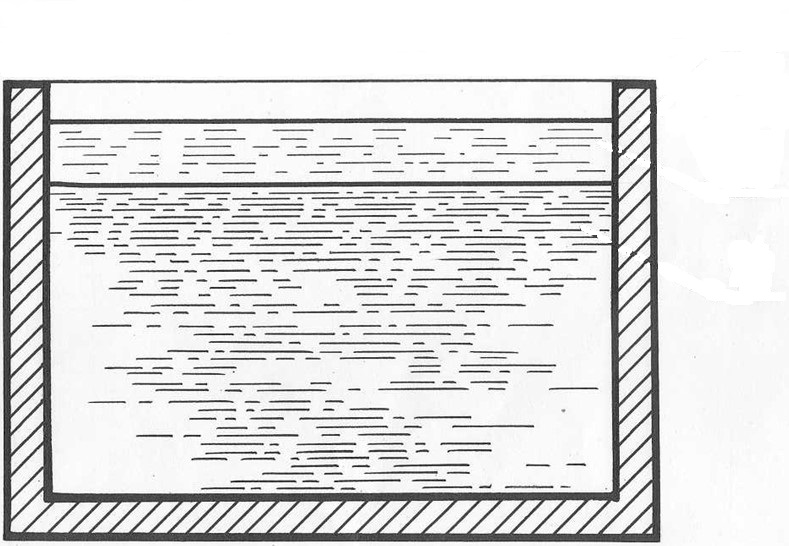
Следовательно, надо при разработке составов покрытий подбирать такие легирующие элементы, которые бы имели эффек­тивную температуру легирования наиболее низкую из возможных.

Процесс поверхностного легирования представляет собой сочетание нескольких одновременно протекающих процессов, которые определяют качество получаемого поверхностного слоя. К этим процессам относятся: нагрев и плавление легирующего покры­тия, смешивание жидкого расплавленного покрытия и жидкого металла отливки с образованием поверхностного легированного слоя, кристаллизация отливки.

Доказано [57], что поверхностное легирование отливки осуществляется в основном за счет и при расплавлении легирую­щего покрытия.

Слой легирующего покрытия специально предназначен для расплавления в процессе контактирования за счет тепла, аккуму­лированного жидким металлом и подбирается с учетом этого фак­тора.

Следовательно, основные свойства поверхностного легиро­ванного слоя формируются при контактировании жидкого расплав­ленного покрытия и жидкого металла. На основании этого иссле­дуемый процесс непосредственного получения, легированного по­верхностного слоя можно представить, как ванну жидкого метал­ла, на поверхность (зеркало) которого наносится слой жидкого расплавленного покрытия (рис. 6).



1

3

2

1 — ванна; 2 — слой расплавленного покрытия; 3 — жидкий металл отливки.

Рисунок 6 - Модель контактной зоны процесса поверхностного легирования.

Согласно данной модели, не учитываются побочные явления, протекающие в контактной зоне в процессе расплавления покры­тия, вследствие их малого влияния непосредственно на свойст­ва легированного поверхностного слоя.

Таким образом, в ванне происходит смешивание и образова­ние единого раствора - поверхностного легированного слоя. Причем, необходимо отметить, что образующийся раствор будет стремиться к устойчиво-равновесному состоянию, т.е. однород­ности состава при наличии благоприятных условий (прежде всего t).

Отсюда и из (24) видно, что необходимо изучить влияние температуры на процесс поверхностного легирования отливки.

## 2.2 Определение эффективной температуры поверхностного легирования

С учетом [59] эффективную температуру легирования t 0 можно принять по аналогии как функцию tзал, имеющей прямолинейный характер и описываемой формулой :

(25)

где:

Вм и Вn - коэффициенты теплоаккумулирующей способности жидкого металла и покрытия;

tзал - температура заливки.

В выражении (7) необходимо определить ВМ. Для этого воспользуемся формулой теплоаккумулирующей способности [60]:

(26)

где:

λ- теплопроводность смеси, Дж.;

С - теплоемкость смеси, Дж/ моль °К;

ρ - плотность смеси, кг/м3.

Тогда с учетом (26) формула (27) примет вид:

(27)

С учетом (24) выражение (23) запишется следующим образом:

(28)

Необходимо определить время τ в формуле (24).

Время расплавления покрытия τpn должно быть меньше или равно времени затвердевания (образования) поверхностного слоя отливки.

Период легирования складывается из времен:

1. Проникновения жидкого металла в поры легирующего покрытия и расплавления покрытия τ1.

2. Смешения жидкого металла и расплавленного покрытия (диффузия) - τ2.

Краевое условие запишем следующим образом:

(29)

раскрывая можно записать:

(30)

Величину времени, потребного на проникновение жидкого металла в поры легирующего покрытия можно определить из [61] по формуле:

(31)

где:

l - глубина проникновения металла в капилляры покрытия, м;

C – коэффициент;

r - радиус капилляра, м;

τпр- продолжительность процесса, с;

S - динамическая вязкость металла, Па·с;

H - высота столба металла, м;

γ - плотность металла, кг/м3;

σ- поверхностное натяжение, н/м;

g - ускорение свободного падения, м/с2;

φ- угол смачивания, град;

рз  - противодавление газов в порах, Па.

Предположим, что покрытие полностью смачивается метал­лом, тогда в уравнении равен 1. С учетом этого определим, чему равно τпр:

(31)

Анализ данной формулы показывает, что время проникно­вения металла в поры покрытия будет значительно зависит от радиуса капилляров, а в конечном итоге, от радиусов частиц легирующего материала, поскольку эта величина стоит во вто­рой степени, т.е. чем частицы будут более дисперсными, тем сильнее процесс легирования будет замедляться.

Для расчета времени плавления легирующего покрытия τпл, применительно к принятой модели, когда плавление покрытия происходит при постоянной или слабо меняющейся температуре и при этом на поверхности расплавляемого тела обеспечивает­ся близкий к постоянству тепловой поток (q = const) воспользуемся формулой [62]:

(32)

где:

- время плавления, с;

ρ - удельная теплота плавления, Дж./кг;

γ – удельный вес, н/м3;

h - переменный размер твердого остатка, отсчитываемый от центра шара, средней плоскости пластины или оси цилиндра, м.

В момент начала плавления имеем h=H, в конце (при τ = τпл) h=0;

К - коэффициент формы тела; 1,2,3 соответственно для пластины, цилиндра и шара;

Qv - тепло, необходимое для нагрева части исходного объема тела V, приходящейся на Iм2 его обогреваемой поверхности F, от исходной средней температуры тела tср (τ=0) до температуры плавления tпл, Дж.;

С- удельная теплоемкость; S - функция, значение которой зависит от закона исходного (при τ = 0) распределения температуры по сечению тела, теплофизических коэффициентов, величины q, исходного размера тела и размера его твердого остатка h, Дж./ моль. К.

Рассчитаем время полного расплавления покрытия, имею­щего форму пластины. В этом случае формула (33) примет вид:

(33)

или (34)

Анализ данных выражений показывает, что время полного расплавления покрытия будет уменьшаться при использовании покрытий c малым удельным весом, наименьшей из возможных толщин и удельных теплот плавления и при максимальном тепло­вом потоке.

Следовательно, время *τ1*можно определить из формулы (35) и (36):

(35)

С учетом (35) выражение (24) запишется следующим образом:

[1- ] (36)

Выполнив все эти расчеты надо для равенства (37), затем найти *K*.

(37)

и уже с учетом коэффициента корректировать толщину покрытия и содержания в нем лигатуры.

В выражении (18) надо определить величину l.

Необходимо также провести теоретическое и эксперимен­тальное рассмотрение зависимости времени τ от радиуса капилляра или радиуса частиц легирующего вещества покрытия.

Экспериментально подтверждение данного теоретического вывода приводится в [63].

Расчеты, проведенные по формулам показывают, что время легирования и необходимые температуры легирования tл при проведении процессов поверхностного легирования на отливках с малыми толщинами стенок или при использовании покрытий с высокими температурами плавления, а также недостаточное количество теплоты расплавленного метал­ла практически не позволяют получать отливки с заданными ха­рактеристиками поверхностного слоя, т.е. не позволяют управ­лять технологическими процессами поверхностного легирования.

Управлять процессом поверхностного легирования меняя толщину покрытия и теплофизические свойства компонентов практически невозможно, т.к., чем толще покрытие и выше темпе­ратура его плавления, тем больше должен быть перегрет заливае­мый металл, а это не всегда практически реализуемо.

Поэтому, для управления процессом поверхностного легирования отливок необходим автономный регулятор tл позволяющий поддерживать последнюю в заданном уровне в течение заранее заданного периода времени, потребного на процесс.

Анализ возможных источников тепла показывает, что такая задача потенциально может выполняться при химических реакциях, протекающих с выделением тепла - экзотермических реакциях. Экзотермические смеси используют в литейном произ­водстве в основном для обогрева прибылей.

Определенными авторами предпринимались попытки использования тепла экзотермических реакций и для поверхност­ного легирования отливок [16-21]. Однако исследований, раскрывающих технологические параметры этих реакций, для целей поверхностного легирования практически неизвестно. Также нет промышленного внедрения рекомендованных процессов и материалов. Это объясняется тем, что экзотермическими реакциями управлять достаточно сложно. Другим перспективным направлением создания качественных поверхностнолегированных слоёв на чугунных отливках может служить применение при создании легирующих порошков наработок специалистов порошковой металлургии по созданию псевдосплавов.