

## Теоретические и прикладные аспекты процесса фильтрационного рафинирования жидких металлов.

(Э.Б. Тен, МИСиС, И.А. Дибров, из доклада на 65-м Международном кон-грессе литейщиков, Корея, 2002 г.)

Фильтрация жидких металлов - эффективный способ повышения качества отливок и снижения трудоемкости их изготовления, что вызвано рафинированием металла от неметаллических включений и газов, а также модифицированием, выявленным, в частности, при фильтрации чугуна и никелевых сплавов. У фильтрованного металла заметно стабилизируются прочностные показатели и существенно возрастают пластические свойства, однако особенно эффективно фильтрация снижает брак отливок по шлаковым и песчаным включениям, скопления неметаллических включений в сталях и чугунах, обработанных магнием и редкоземельными металлами. При этом значительно улучшаются технологические свойства фильтрованного металла - обрабатываемость давлением и резанием.

Перечисленные достоинства фильтрации обусловили широкое применение этого способа рафинирования жидкого металла во многих странах, чему предшествовали глубокие исследования рассматриваемого процесса, позволившие выявить основные механизмы рафинирования при фильтрации и условия перехода включений из жидкого металла на поверхность литейного фильтра. Разработаны различные типы фильтров и основанные на их использовании технологические процессы. В России наибольшее применение получили *зернистые и сетчатые фильтры из тканого кремнеземного стекловолокна*. В США и Европе при производстве отливок преимущественно используют *пеночерамические и ячеистые фильтры*. Во многих странах накоплен большой опыт применения литейных фильтров для рафинирования разных сплавов применительно к различным условиям литья.

Вместе с тем, этот опыт до настоящего времени полностью не обобщен.

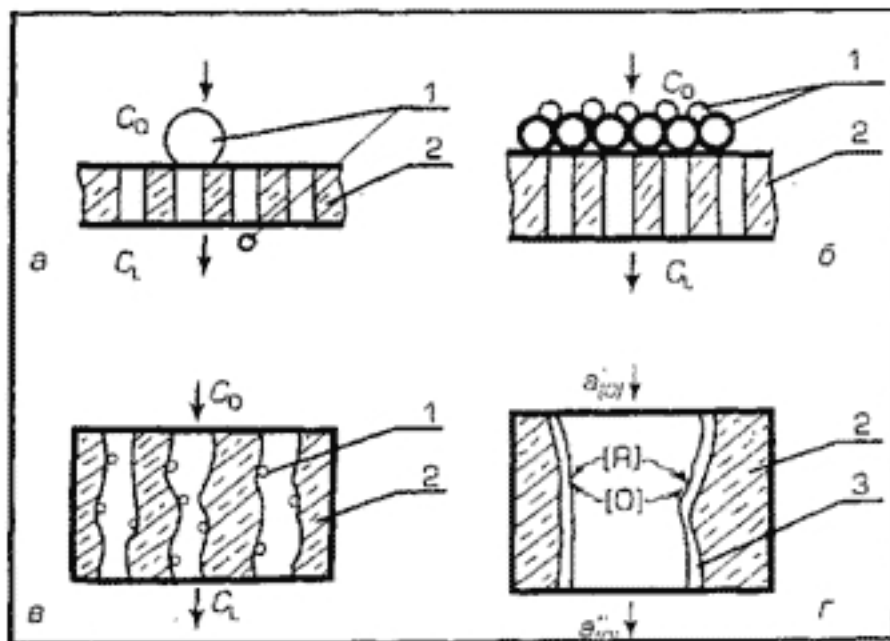
По существующим представлениям рафинирующий эффект фильтрации обусловлен осаждением на фильтре суспензированных в жидком металле неметаллических включений. При этом если размер включений больше ширины проходного сечения канала фильтра, то такие включения задерживаются на внешней стороне фильтра с

входной стороны (рис. 1, а). Такой механизм фильтрования называют **внешним или поверхностным**

Фильтр, в данном случае, выполняет роль сетки или сита. Поэтому рассматриваемый механизм также называют

**сеточным или ситовым**

. По мере накопления включений со стороны входной поверхности фильтра они образуют слой, подобный кеку. При этом ширина канала в фильтре становится меньше, и фильтр может задерживать включения меньшего размера, чем в начале фильтрования (рис. 1,б).



**Рис. 1.** Механизмы фильтрационного рафинирования жидких металлов: а - сеточный; б - сеточно-кековый; в - адгезионный; г - подложечный, где 1 - неметаллические включения, 2-фильтр, 3- подложка для образования неметаллической фазы.

Включения размером меньше ширины канала фильтра могут свободно (по геометрическим факторам) проходить через него. Однако часть таких включений, достигая стенок канала фильтра, осаждаются на его внутренних поверхностях (рис. 1, в). Такой механизм улавливания неметаллических включений называют **внутренним**. Поскольку включения на поверхности фильтра в этом случае удерживаются за счет сил адгезии, то рассматриваемый механизм также называют **адгезионным**

Таким образом, известные представления связывают рафинирующий эффект фильтрования лишь с очисткой жидкого металла от химически связанных примесей в виде неметаллических включений, суспензированных в расплаве.

Как показали исследования, наряду с изложенными выше механизмами, при фильтровании реализуется **подложечный** механизм рафинирования, сущность которого заключается в том, что на фильтре может осаждаться также часть растворенной, то есть химически не связанной примеси. При этом реакция связывания сверхравновесно растворенной примеси в неметаллическую фазу происходит непосредственно на поверхности фильтра как на готовой подложке.

Основное условие для реализации подложечного механизма фильтрационного рафинирования жидких металлов - наличие сверхравновесно растворенной примеси и химически связывающего ее элемента. При этом степень химического пересыщения расплава элементами, образующими неметаллическую фазу, должна быть больше единицы.

Согласно предлагаемому механизму, неметаллическая фаза образуется непосредственно на поверхности фильтра. Для этого компоненты, образующие неметаллическую фазу, например раскислитель (R) и кислород (O), доставляются к поверхности фильтра (рис. 1, г), где они реагируют друг с другом с образованием неметаллической фазы ( $R_mO_n$ ). При этом материал фильтра может быть химически инертным к течению этой реакции или же может участвовать в ней в качестве третьего компонента.

В первом случае активность кислорода в фильтрованном металле может снизиться лишь до уровня, определяемого равновесием реакции. А во втором случае возможно достижение более глубокой раскисленности фильтрованного металла из-за уменьшения активности  $R_mO_n$  при взаимодействии продукта реакции с материалом фильтра.

Наличие подложечного рафинирующего эффекта обнаружено при рафинировании стали и чугуна от сверхравновесно растворенного кислорода.

***Согласно измерениям, при фильтровании жидких сталей и чугунов активность***

**кислорода снижается на 20-40%.**

Экспериментально подтверждено, что в случае активного химического взаимодействия неметаллической фазы - продукта раскисления ( $MnO$ ) с материалом фильтра ( $SiO_2$ ), значение активности кислорода больше, чем в случае заторможенности такого взаимодействия при применении фильтров из  $Al$

$O$ <sup>2</sup>  
и  $MgO$ <sup>3</sup>.

Таким образом, при фильтровании реализуются три самостоятельных механизма рафинирования. Соответственно, общий рафинирующий эффект фильтрования равен сумме рафинирующих эффектов различных механизмов:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_G + \eta_A + \eta_L$$

где  $\eta_{\Sigma}$ ,  $\eta_G$ ,  $\eta_A$ ,  $\eta_L$  - соответственно, общий, сеточный, адгезионный и подложечный рафинирующий эффекты.

Значения  $\eta_G$ ,  $\eta_A$  определяются эффективностью улавливания неметаллических включений. Значимость их зависит от степени загрязненности жидкого металла грубыми и дисперсными включениями, соответственно. Значение  $\eta_L$  определяется эффективностью осаждения на фильтре растворенной части примеси. Оценка значимости  $\eta$

$\eta_L$   
при  $\eta$

$\eta_G$   
= 0 показывает, что в условиях фильтрования слабо раскисленной (1% Mn) стали доля его в общем снижении содержания кислорода в фильтрованной стали достигает 60-70 %. При фильтровании более раскисленных сталей доля  $\eta$

$\eta_L$   
снижается и в зависимости от расхода раскислителя и материала фильтра колеблется в пределах 5-35% от  $\eta$

$\eta_{\Sigma}$   
. При фильтровании жидкого чугуна доля  $\eta$

$L$   
составляет 13- 25% от  $\eta$   
 $\Sigma$   
.

Эффективность сеточного механизма фильтрационного рафинирования численно равна доле неметаллических включений, размер которых превышает ширину каналов фильтра.

Эффективность подложечного механизма можно прогнозировать.

Для прогнозирования эффективности адгезионного механизма фильтрационного рафинирования отсутствуют корректные количественные модели. В связи с этим предложено следующее решение этой проблемы.

### **Количественная модель для изотермических условий фильтрования.**

Адгезионный механизм рафинирования реализуется в три стадии: доставка неметаллических включений к поверхности фильтра (1-я стадия), переход включениями границы раздела «жидкий металл - фильтр» (2-я стадия) и агрегирование включений на фильтре (3-я стадия). В изотермических условиях фильтрования наиболее медленной является 1-я стадия, лимитирующая весь процесс фильтрационного рафинирования. В этом случае все неметаллические включения, которые могут быть доставлены к поверхности фильтра, будут осаждены на ней, то есть все они смогут преодолеть границу раздела и агрегироваться на фильтре. Поэтому эффективность фильтрационного рафинирования численно равна коэффициенту осаждения неметаллических включений.

Доставка неметаллических включений к поверхности литейного фильтра может происходить за счет диффузии и инерционного смещения частиц, прямого захвата (зацепления) и седиментации, а также под действием центробежных сил и градиента скорости потока жидкого металла по сечению канала литейного фильтра. Воздействие разных механизмов на доставку неметаллических включений накладывается друг на друга. Поэтому интегральный коэффициент осаждения связан с парциальными коэффициентами осаждения.

*Парциальные коэффициенты осаждения обусловлены инерцией, зацеплением, диффузией, седиментацией, центробежными силами и градиентом скорости.*

Эффективность инерционного осаждения оценивали по критерию Стокса и установили, что фактическое значение этого критерия значительно меньше критического, следовательно, инерционное осаждение практически не реализуется.

Расчеты показывают, что эффект зацепления мал. Он становится значимым при размере неметаллических включений более 50 мкм. Однако даже при размере включений 100 мкм парциальный коэффициент осаждения, обусловленный зацеплением, не превышает 0,1.

Седиментационное осаждение эффективно реализуется при низких скоростях фильтрации, а градиентное и центробежное осаждения, наоборот, усиливаются по мере повышения скорости фильтрации.

С увеличением толщины фильтра коэффициент осаждения возрастает, а с ростом гидравлического радиуса канала фильтра он, наоборот, уменьшается, однако скорость фильтрации также существенно влияет на вид этих закономерностей, так как зависимость интегрального коэффициента осаждения от скорости фильтрации имеет экстремальный характер.

При низких скоростях фильтрации высокая эффективность осаждения неметаллических включений обусловлена увеличением эффекта седиментации. При высоких скоростях фильтрации вызвана увеличением роли градиентного и центробежного механизмов осаждения включений. С увеличением размера включений влияние скорости фильтрации ослабевает.

### **Количественная модель для неизотермических условий фильтрования.**

Осаждение неметаллических включений на поверхности литейного фильтра происходит только при их прямом контакте. В неизотермических условиях фильтрования этому может препятствовать намороженная на поверхности холодного фильтра затвердевшая

корка фильтруемого металла, что становится непреодолимым препятствием на пути неметаллических включений к поверхности фильтра. В результате неметаллические включения не могут преодолеть границу раздела «металл - фильтр» и агрегироваться на фильтре. Процесс формирования твердой корки имеет временный характер, так как по мере прогрева фильтра корка расплавляется и исчезает. Однако при наличии твердой корки часть поверхности фильтра не участвует в процессе рафинирования. Поэтому в неизотермических условиях фильтрования на лимитирующую 1-ю стадию может временно накладываться 2-я лимитирующая стадия.

## Оценка рафинирующей способности фильтров.

Изложенные представления позволяют предложить методику количественной оценки рафинирующей способности различных фильтров. Сложность такой оценки обусловлена тем, что из-за конструктивных особенностей различные фильтры имеют разную толщину, и их нельзя привести к одной толщине.

Используя полученные экспериментально показатели содержания неметаллических включений в нефильтрованном и фильтрованном металлах, фактические толщины использованных фильтров, а также вычисленные значения параметра неизотермичности, определили значения рафинирующей способности фильтров:

- сетчатый из тканого  $\text{SiO}_2$  волокна с размером ячеек 1,65 x 1,65 мм - 176;
- пенокерамический из SiC с каналами 2 - 2,5 мм (4 поры на 1 см) - 120;
- зернистый из магнезитовых гранул диаметром 12 - 15 мм - 41.

**Согласно приведенным данным, наибольшей рафинирующей способностью (176) при фильтровании чугуна обладает сетчатый фильтр из тканого кремне-земного стекловолокна**, используемый в Фирам-процессе. Высокой рафинирующей способностью обладает и пенокерамический фильтр из карбида кремния марки Foseco (120). Заметно более низкой рафинирующей способностью при фильтровании чугуна характеризуется зернистый фильтр из магнезитовых гранул. Хотя потенциально рафинирующая способность сетчатого фильтра выше, чем пенокерамического, однако практически достигаемая степень очистки расплава от неметаллических включений ограничена малой толщиной фильтра. Пенокерамический фильтр сочетает высокую рафинирующую способность с возможностью варьирования толщины фильтра, что обеспечивает более широкий диапазон требуемой степени рафинирования жидкого металла. Зернистые фильтры, хотя и уступают сетчатым и пенокерамическим фильтрам по рафинирующей способности, но при увеличении толщины фильтра до 50-100 мм обеспечивают эквивалентную эффективность

рафи-нирования. При этом зернистые фильтры сохраняют рафинирующую способность при фильтровании значительного количества жидкого металла.

### **Расчет фильтра и процесса фильтрования.**

С учетом результатов выполненных исследований разработана методика расчета фильтра и процесса фильтрования, по которой, прежде всего, определяют минимально допустимую начальную температуру фильтра, выше которой каналы фильтра не перекрываются затвердевшим металлом.

Далее рассчитывают парциальные коэффициенты осаждения, интегральный коэффициент осаждения для изотермических условий фильтрования. Затем определяют показатель неизотермичности процесса фильтрования и рассчитывают интегральный коэффициент осаждения для неизотермических условий фильтрования. Если расчетное значение меньше требуемого, то желаемый результат достигают, изменяя толщину фильтра, начальную температуру, гидравлический радиус, температуру заливки и скорость фильтрации в допустимых пределах их значений.

Далее корректируют размеры элементов литниковой системы. При этом сначала по формуле Оззана рассчитывают площадь минимального сечения элемента литниковой системы (стояка), задавая значение коэффициента расхода литниковой системы без фильтра. Затем методом последовательного приближения находят уточненное значение коэффициента расхода литниковой системы с фильтром.

Определяют площадь минимального сечения элемента литниковой системы с фильтром, а также площади литникового хода (шлакоуловителя) и питателя.

Использование методики позволяет определять параметры фильтра: гидравлический радиус, толщину фильтра, площадь фильтра, режима фильтрации: скорость фильтрации, начальную температуру и температуру заливки, а также конструктивные параметры литниковой системы с фильтрующим элементом, площади минимального сечения стояка, литникового хода (шлакоуловителя) и питателя.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований получены дополнительные представления о механизме фильтрационного

рафинирования жидких металлов. Выявлено, что фильтры обладают более широкими потенциальными возможностями рафинирования, чем это представлялось до сих пор. Так, в результате сеточного механизма рафинирования задерживаются крупные включения, мелкие включения осаждаются на внутренних поверхностях фильтра по адгезионному механизму. Фильтр также может служить активной подложкой для прямого осаждения сверхравновесно растворенной части примеси, связывая ее в неметаллическую фазу непосредственно на поверхности фильтра.

Предложенные методы прогнозирования эффективности фильтрационного рафинирования для изотермических и неизотермических условий фильтрования позволяют оценить ожидаемую эффективность фильтрования жидких металлов и найти наиболее рациональные пути достижения требуемой степени очистки расплава от неметаллических включений, что является особенно актуальным, так как экстремальная зависимость интегрального коэффициента осаждения от ряда технологических факторов не позволяет методом дедукции спрогнозировать ожидаемый результат.

Разработанная методика оценки рафинирующей способности фильтров дает возможность сравнивать различные типы фильтров по объективному показателю и осуществлять их выбор с учетом конструктивных особенностей и возможностей. Кроме того, методика расчета фильтра и процесса фильтрования, базирующаяся на результатах теоретических исследований, позволяет расчетным путем определить необходимые значения параметров фильтра, режима фильтрации и элементов литниковой системы.

[Вернуться в раздел "Техническая информация"](#)