

## Фильтрационное рафинирование жидких металлов, вклад отечественных ученых и специалистов.

*(По статье Э.Б. Тена в ж-ле «Литейное пр-во», № 9, 2000 г.)*

*Фильтрационное рафинирование* жидких металлов в последние годы широко применяют во многих странах. Россия занимает ведущие позиции в мире в области создания фундаментальных основ фильтрационного рафинирования. Наибольший вклад в разработку и освоение этого эффективного техпроцесса внесли ученые и специалисты Московского института стали и сплавов. Пионерские работы, начатые в конце 40-х - начале 50-х гг. доц. В.С.Калабушкиным (1903...1975 гг.), были развернуты под руководством проф. А.Г.Спасского (1895... 1975 гг.) и продолжены его учениками — профессорами А.В.Курдюмовым, М.В.Пикуновым и В.М.Чурсиным. Они внесли основной вклад в развитие фильтрационного рафинирования (ФР) расплавов цветных металлов. Первые публикации, относящиеся к 1957...1959 гг., были посвящены общей оценке возможностей ФР. В более поздних работах детально изучена эффективность очистки ФР литейных и деформируемых Al-сплавов, Mg-, Cu-, Zn-, Sn-сплавов. Пристальное внимание в работах М.В. Пикунова уделено особенностям течения металлических расплавов через пористые фильтры.

Наиболее глубокие и развернутые исследования фильтрационного рафинирования цветных сплавов выполнены А.В. Курдюмовым (1922...1993 гг.). Результаты этих исследований появились в многочисленных публикациях и обобщены в докторской диссертации, в справочных изданиях, монографиях, учебниках и учебных пособиях. Последние были изданы дважды, а монография стала настольной книгой специалистов, работающих в области фильтрования. В его работах получили глубокое развитие начальные идеи А.Г. Спасского о механизме фильтрационного рафинирования. Он первым обратил внимание на термодинамические аспекты процесса осаждения неметаллических включений (НМВ) на поверхности фильтра и показал, что при фильтровании Al-расплавов работа адгезии включений к фильтру определяется поверхностным натяжением жидкого металла и несмачиванием им материала фильтра ввиду незначительности ее химической составляющей при малости молекулярной составляющей. А.В.Курдюмов совместно с С.В.Инкиным (1946... 1995 гг.), также впервые оценил расклинивающее давление между включением и фильтром, возникновение которого обусловлено формированием двойного электрического слоя на границе их контакта. На основе этих исследований авторами предложена известная классификация фильтров на пассивные и активные в зависимости от емкости двойного электрического слоя. В работах А.В.Курдюмова впервые показано наличие критической скорости фильтрации жидких металлов и **дегазирующего эффекта фильтрования**. Заметный вклад в развитие технологии ФР внес Я.И. Шкленник (1910... 1984 гг.). Он со

своим учеником Е.И. Палубковым впервые исследовал возможность ФР высокотемпературных расплавов и показал, что *фильтрованием можно эффективно рафинировать и стали, и магнитные сплавы*. Причем реализовал этот процесс в оптимальном варианте — в условиях литья по выплавляемым моделям, когда необходимость в специальном предварительном подогреве фильтра отпадает из-за совмещения этой операции с прокаливанием форм. Им же предложена методика расчета зернистых фильтров, которая, несмотря на эмпирический подход, сыграла свою положительную роль. Новое эффективное направление ФР было разработано и исследовано проф. Л.И. Леви (1911... 1976 гг.) совместно с сотрудниками ВНИИлитмаша во главе с В.И.Фундатором. Оно было основано на применении в качестве фильтра тканой сетки из специального стекловолокна высокой химической и термической стойкости в жидком металле. Авторы дали разработке фирменное название

**"ФИРАМ-процесс" (фильтрационное рафинирование металлов)**

, который получил затем международную известность. Фильтры из тканого стекловолокна, в основном, применяли в литье чугуна, но их с успехом используют и для рафинирования цветных металлов, а также магнитных сплавов и небольших масс стали.

**П**  
**рименение "ФИРАМ-процесса" обеспечивает снижение в расплаве чугуна содержания газов и неметаллических включений, уменьшение размеров НМВ и графита, увеличение степени перлитизации и дисперсности перлита, сокращение потерь от брака, улучшение обрабатываемости режущим инструментом и свариваемости**

.  
При этом в фильтрованном чугуне заметно изменяются структурно-чувствительные свойства - выявлены рост поверхностного натяжения и плотности, снижение вязкости, увеличение переохлаждения и жидкотекучести. Специальные эксперименты позволили зафиксировать и уменьшение активности растворенного кислорода, т.е. увеличение степени раскисленности расплава чугуна при фильтровании.

Автор этого обзора Э.Б. Тен посвятил многие годы исследованию теоретических и практических аспектов ФР высокотемпературных расплавов, преимущественно сталей, чугунов и Ni-сплавов. В этих исследованиях принимали участие А.М. Михайлов (1926... 1990 гг.), В.П.Соловьев, А.А.Лепешкин и др. Результаты исследований опубликованы в многочисленных отечественных и зарубежных изданиях, а также обобщены в докторской диссертации автора.

Э.Б. Тен дополнил известные представления и показал, что в процессе фильтрования, наряду с сеточным и адгезионным, реализуется дополнительный рафинирующий эффект, обусловленный тем, что на поверхности фильтра осаждается и сверхравновесно растворенная часть примеси, которая химически не связана к моменту фильтрования в НМВ. При этом химическая реакция связывания примеси в НМВ реализуется непосредственно на поверхности фильтра, которая в данном случае служит готовой гетерогенной подложкой. Новый рафинирующий эффект показан экспериментально при рафинировании чугуна и стали от сверхравновесно

растворенного кислорода. Предложено уравнение для описания нового рафинирующего эффекта.

Показано, что общий рафинирующий эффект фильтрования равен сумме его парциальных эффектов — сеточного (I), адгезионного (II) и подложечного (III). При фильтровании расплавов СЧ вклад эффекта III составляет 10...25% от общего рафинирующего эффекта, при фильтровании хорошо раскисленных сталей он колеблется в пределах 5...20%, но при фильтровании слабораскисленных сталей достигает 60...70%. Важный результат теоретических исследований ФР жидких металлов - количественные модели его описания, основанные на том, что обычно лимитирующей стадией является доставка НМВ к поверхности фильтра (1-я стадия). Но в неизотермических условиях фильтрования на поверхности фильтра возможно образование корочки затвердевшего фильтруемого металла, что препятствует переходу включениям границы раздела "металл-фильтр" (2-я стадия). А при высоких скоростях фильтрации НМВ, осажденные на поверхности фильтра (3-я стадия), могут вновь смываться металлом. Следовательно, в общем случае на лимитирующую 1-ю стадию могут накладываться ограничения, обусловленные действием дополнительных лимитирующих факторов 2-й и 3-й стадий. С учетом изложенного предложено уравнение для количественного описания эффективности ФР жидких металлов от НМВ. В результате исследований было получено, что в зависимости от степени неизотермичности на всей или части поверхности канала фильтра может образовываться твердая корочка, которая со временем оплавляється и исчезает, т.е. действие дополнительного лимитирующего фактора на 2-й стадии носит временной характер. Для количественной оценки влияния этого фактора на эффективность фильтрования предложен коэффициент неизотермического фильтрования  $\Theta$ , который отражает степень свободы поверхности каналов фильтра от твердой корочки фильтруемого металла. В условиях изотермического фильтрования  $\Theta=1$ . При полном блокировании поверхности каналов фильтра твердой корочкой в течение всего процесса фильтрования  $\Theta = 0$ . В этом случае процесс фильтрационного рафинирования не реализуется, несмотря на то, что жидкий металл фильтруется. В большинстве случаев  $0<\Theta<1$ . Причем в процессе фильтрования, вследствие прогрева фильтра теплотой перегрева металла,  $\Theta$  возрастает от начального до предельно возможного ( $\Theta = 1$ ). Предложена методика расчета текущих значений  $\Theta$  численным моделированием теплового взаимодействия жидкого металла с фильтром в его канале и последующего вычисления интегрального значения  $\Theta$ .

Разработана методика определения содержания в фильтруемом расплаве крупных неметаллических включений, которые смываются с поверхности фильтра в процессе фильтрования. Методика основана на расчете критического размера включений, смывающихся с поверхности фильтра при данной скорости фильтрации. Расчетным путем получен важный практический результат: при фильтровании высокотемпературных расплавов (сталей) критический размер НМВ при одних и тех же

скоростях фильтрации на порядок больше, чем при фильтровании низкотемпературных А1-расплавов, что означает возможность фильтрации сталей со скоростями, на порядок превышающими скорость фильтрации А1-расплавов.

Предложенные модели существенно отличаются от разработанных другими авторами. Они базируются на четких представлениях о механизме фильтрационного рафинирования, получены на основе общих теоретических подходов и включают разные количественные соотношения для описания процессов рафинирования жидкого металла от сверхравновесно растворенной части примеси и НМВ. Э.Б. Теном выполнен наиболее полный анализ факторов доставки НМВ к поверхности фильтра. На основе теоретических исследований сформулированы практические рекомендации по выбору скоростей фильтрации расплавов различных металлов. При рафинировании легкоплавких сплавов, ввиду низкой критической скорости фильтрации, предпочтителен режим медленного фильтрования с  $v_{\text{ф}} < 0,1$  м/с. При фильтровании сталей (учитывая преимущественный размер частиц 5...25 мкм) желательно быстрое фильтрование с  $v_{\text{ф}} > 0,1$  м/с, но без превышения критической скорости фильтрации. Чугуны можно фильтровать при малых и средних скоростях, в том числе и при  $v_{\text{ф}} = 0,1$  м/с, что обусловлено необходимостью рафинирования чугуна прежде всего от грубых частиц размером  $> 50... 100$  мкм в виде песчаных и шлаковых включений, скоплений продуктов взаимодействия модификаторов (Mg, Ce, Y) с кислородом и серой (более мелкие частицы, размер которых сопоставим с размером графитных включений, меньше влияют на свойства чугуна и качество отливок). Для таких частиц критическая скорость фильтрации невелика. В то же время они эффективно доставляются к поверхности фильтра и при средних скоростях фильтрации.

Э.Б. Тен разработал методику количественной оценки рафинирующей способности фильтров, в качестве параметра которой предложен коэффициент **A**, определяемый только конструктивными особенностями фильтра при сопоставимых условиях фильтрования. При фильтровании ЧШГ сетчатый фильтр из кремнеземного стекловолокна обладает наибольшей рафинирующей способностью (

**A** = 175); у пенокерамического фильтра из карбида кремния

**A** = 115, а у зернистых фильтров

**A** = 9...32. Однако, несмотря на лучшую рафинирующую способность сетчатых фильтров, практически достигаемый рафинирующий эффект при их использовании невелик из-за малой толщины таких фильтров ( $< 2...3$  мм). Пенокерамические фильтры при толщине фильтра 15 мм обеспечивают вдвое больший рафинирующий эффект. Зернистые фильтры, хотя и существенно уступают по рафинирующей способности сетчатым и

пеночерамическим, но за счет большой толщины (50... 100 мм) могут обеспечить такой же или даже больший рафинирующий эффект.

Методика расчета фильтра, предложенная Э.Б. Теном, представляет собой комплекс решения гидравлической, теплофизической и кинетической задач.

При изучении практических аспектов технологии фильтрационного рафинирования сталей, чугунов и Ni-сплавов показано, что ФР возможно лишь при термодинамической обусловленности соответствующих реакций оксидо-, сульфидо- и нитридообразования. Разработаны, опробованы в промышленных условиях и освоены различные технологические варианты ФР для литья в разовые песчаные формы и ЛВМ. На фильтрующие материалы, конструкции фильтров и фильтрующих элементов, способы получения фильтров и способы фильтрования получено несколько десятков авторских свидетельств и патентов.

Вклад литейной кафедры МИСиС в разработку теории и технологии ФР жидких металлов общепризнан. По этой тематике на кафедре выполнено две докторских и 12 кандидатских диссертаций.

Сотрудниками кафедры издана монография по фильтрационному рафинированию А1-расплавов.

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