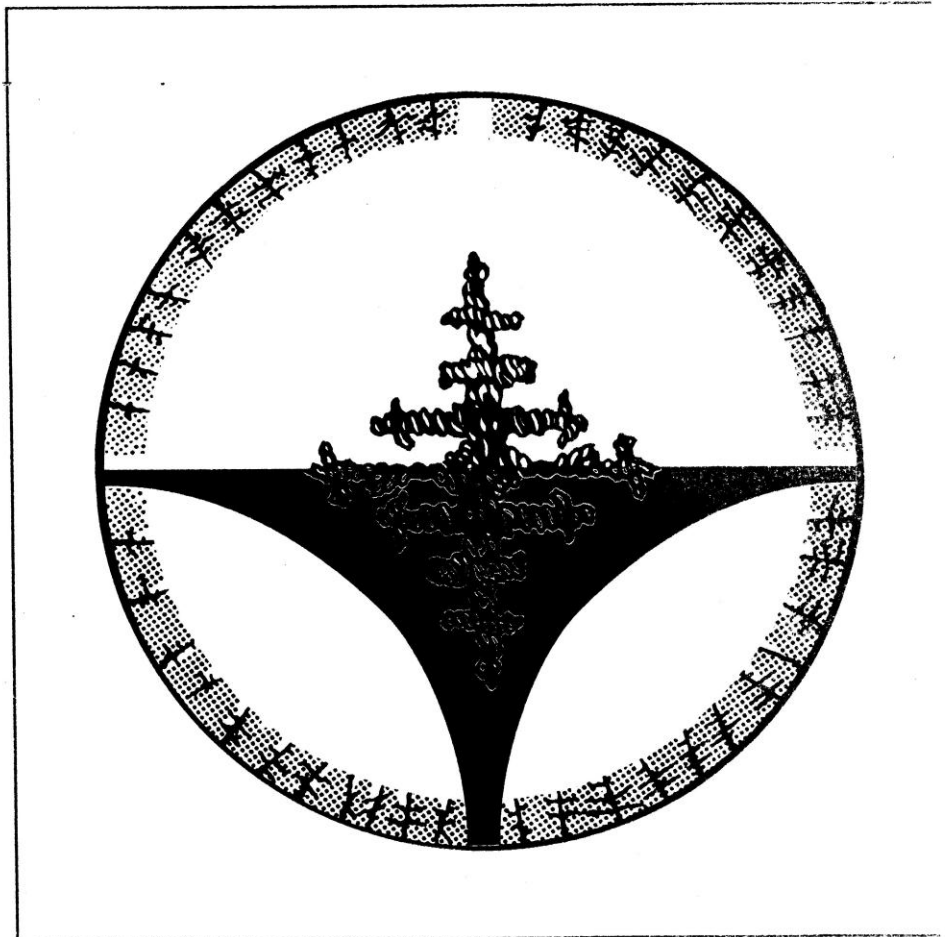


ISSN 0235-5884

ПРОЦЕССЫ ЛИТВА 4 • 2008



УДК 621.745.56: 538.4

А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш, В. М. Сафонов,
К. Е. Писмарев*

Донецкий национальный технический университет МОН Украины, Донецк
*ОАО «Алчевский металлургический комбинат», Алчевск

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ПРОДУВКЕ МЕТАЛЛА В КОВШЕ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ. Сообщение 1

Рассмотрены существующие подходы к оценке интенсивности перемешивания металла в ковше при его продувке инертным газом. Представлены результаты физического моделирования процессов перемешивания металла в ковше. Выполнено сравнение возможностей расчета времени перемешивания жидкой ванны по эмпирическим формулам, предлагаемым различными исследователями.

Розглянуто існуючі підходи щодо оцінки інтенсивності перемішування металу в ковші при його продувці інертним газом. Наведено результати фізичного моделювання процесів перемішування металу в ковші. Виконано порівняння можливостей розрахунку тривалості перемішування рідкої ванни за емпіричними формулами, які пропонуються різними дослідниками.

The existing methods for estimation mixing intensive of metal in ladle with argon injection had been examined. Results of physical modeling mixing processes in the ladle are presenting. Comparison calculation results of mixing time for different empiric formulas had been carry out

Эволюционное развитие технологических систем внепечной доводки стали обуславливает необходимость оптимизации техники перемешивания металла в ковше, которое, как правило, осуществляется путем вдувания в расплав некоторого количества инертного газа (аргона) [1, 2]. Между тем, практика последних десятилетий показывает, что вопрос рационального перемешивания металла в ковше при продувке аргоном является особенно актуальным при работе установок ковш-печь. Это объясняется тем фактом, что в ковшах, применяемых на установках ковш-печь, предусматривается, как правило, один-два (иногда три) продувочных узла, расположение которых регламентируется определенными технологическими соображениями [2-4]. Во-первых, продувочные узлы необходимо располагать таким образом, чтобы вдуваемый в металл аргон не попадал в зону работы электродов, используемых для подогрева металла и шлака. Во-вторых, один из продувочных узлов должен располагаться в зоне подачи ферросплавов, что позволяет обеспечить высокую степень их усвоения. В-третьих, продувочный узел не может располагаться в зоне падения струи металла во время наполнения ковша. В-четвертых, продувочный узел не может располагаться вблизи стенки ковша, поскольку в этом случае будет происходить повышенный износ огнеупоров в области распространения вос-

ходящего потока. В-пятых, в зависимости от конкретной технологической операции, выполняемой в агрегате ковш-печь, интенсивность продувки металла аргоном может варьироваться в значительных пределах.

В металлургической практике известно, что ковши для разливки стали могут иметь вместимость от 10-15 до 300-350 т жидкой стали. Кроме того, они имеют существенное различие в геометрической конфигурации, что находит свое отражение в различном соотношении глубины ванны металла к диаметру ковша. Как правило, это соотношение варьируется в пределах 0,8-1,3.

В целом вопросы организации рациональных режимов продувки металла аргоном требуют определенной оптимизации процессов перемешивания с целью наиболее полного использования энергии вдуваемого газа для конкретных условий обработки. Между тем, процесс перемешивания металла в ковше является чрезвычайно сложным физико-химическим явлением и проявляется в самых разнообразных системах. Соответственно, при выборе критериев оценки перемешивания приходится принимать во внимание, например, поведение растворимых и частично растворимых, химически активных и инертных жидкостей и твердых частиц с различной плотностью, а также медленные ламинарные и быстрые потоки и их взаимодействие. Поэтому в настоящее время не существует единой теории, способной детально объяснить процесс перемешивания в жидкостях и обеспечить прямые вычисления параметров этого явления.

Большинство исследователей процессов перемешивания в металлургических и химических технологиях в качестве интегральных показателей эффективности перемешивания используют показатели интенсивности ϵ_m и времени перемешивания τ_m [5-9].

При этом интенсивность перемешивания ϵ_m (Вт/т) отражает мощность газового потока, затраченную на перемешивание 1 т расплава, а время перемешивания τ_m интерпретируется как время гомогенизации расплава по химическому составу или температуре. Известные зависимости для количественной оценки указанных показателей являются

Таблица 1. Некоторые выражения для определения интенсивности перемешивания жидкости [9-11]

Исследователи		Выражение для ϵ_m , Вт/т
1	Themelis и Staturewicz	$\frac{742 \cdot Q T_L}{W} \ln \left(1 + \frac{H}{10,34} \right)$
2	Sinha и McNellan	$\frac{854 \cdot Q T_L}{W} \ln \left(1 + \frac{\rho_L g H}{P_a} \right)$
3	Krishnamurthy и др.	$\frac{4 Q P_a T}{298,2 \pi D^2 L} \ln \left(1 + \frac{\rho_L g H}{P_a} \right)$
4	Nakanishi и др.	$\frac{6,18 \cdot Q T_L}{W} \ln \left(1 + \frac{H}{1,48} \right)$
5	Sandberg	$\frac{6,18 \cdot Q T_L}{W} \left[1 - \frac{273}{T_L} + \ln \left(\frac{P_a + \rho_L g H}{P_a} \right) \right]$

Примечание: Q - расход вдуваемого газа, м³/с (в выражениях 4 и 5, м³/мин); T_L - температура жидкости, К; W - масса жидкости, т; H - глубина ванны, м; ρ_L - плотность жидкости, кг/м³; P_a - атмосферное давление, Па

Таблица 2. Некоторые зависимости для определения времени перемешивания жидкости в ковше [9-11]

Исследователи		Размеры модели и масса жидкости	Удельный расход газа, (м ³ /мин/т)	Время перемешивания, с
1	Nakanishi и др.	H=0,465 м, D=0,42 м; m=64 кг	0,015-0,06	$\tau_m = 800 \epsilon_m^{-0,4}$
2	Asai и др.	H=0,405; 0,2 и 0,10 м; H/D=0,5-1 m=52 кг (max) =0,4 кг (min)	0,019-0,90	$\tau_m = 274 \epsilon_m^{-0,33} H^{-1} R^{1,36}$
3	Sinha и McNallan	H=0,48 м, D=0,45 м; m=76 кг	0,02-0,4	$\tau_m = 692 \epsilon_m^{-0,89}$
4	Themelis и Stapiurewicz	H=0,67-1,0 м, D=0,66 м; m=310 кг (max)	0,13-0,96	$\tau_m = 164 \epsilon_m^{-0,39} H^{0,39}$
5	Mazimder и Guthries	H=0,5-1,1 м; D=1,12 м; m=1000 кг	0,012-0,06	$\tau_m = 274 \epsilon_m^{-0,33} H^{-1} R^{1,66}$
6	Mietz и Oeters	H=1,0 м, d=0,63 м; m=311 кг	0,038-0,29	$\tau_m = C_1 Q^{-n}$

Примечание: H - глубина ванны; D - диаметр модели ковша, m - масса жидкости, R - радиус модели ковша; ϵ_m - интенсивность перемешивания; C₁ и n - функции присоединенного трассера и наблюдаемого размещения; Q - расход газа

эмпирическими, так как получены обработкой результатов экспериментов на физических моделях. В табл. 1 и 2 соответственно представлены эмпирические формулы для расчета интенсивности и времени перемешивания, обобщенные по данным различных исследователей. При этом приведенные зависимости для времени перемешивания получены для определенных параметров физических моделей.

Анализируя данные табл. 1, следует отметить, что во всех предлагаемых выражениях для определения интенсивности перемешивания ϵ_m имеются только четыре рабочих параметра, влияющих на конечный результат; общий расход газа, масса жидкости и глубина ванны в ковше, а также температура. Такой подход, на наш взгляд, представляется несколько упрощенным, поскольку на интенсивность перемешивания также влияют вязкость жидкости, количество и расположение продувочных узлов, длительность продувки и т. п. Между тем нельзя не заметить, что результаты расчетов по формулам, приведенным в табл. 1, могут существенно отличаться друг от друга. Это, вероятно, объясняется тем фактом, что эти формулы следует рассматривать как эмпирические выражения, полученные для определенных условий моделирования и работающие в определенном диапазоне параметров.

Все выражения для определения времени перемешивания (табл. 2) включают в себя показатель интенсивности перемешивания, а также учитывают глубину ванны и радиус модели ковша. Однако, например, исследователи Asai и Mazumbar в своих формулах рекомендуют использовать величину глубины ванны в степени (-1), а исследователи Themelis и Stapiurewicz учитывают эту глубину показателем степени (0,39), что свидетельствует о неоднозначности влияния этого фактора. Соответственно, время перемешивания в первом случае будет уменьшаться при увеличении глубины ванны, а во втором – повышаться. Кроме того, анализируя данные табл. 2, можно отметить, что условия физического моделирования, при которых получены зависимости по определению τ_m , в большинстве своем весьма далеки от условий, характерных для внепечной обработки стали в ковше: удельные расходы вдуваемого газа в промышленных ковшах, имеющих

характерное отношение (H/D) от 0,8 до 1,5, обычно лежат в диапазоне 0,0015-0,01 м³/мин/л.

В целом же следует отметить, что формулы, приведенные в табл. 1 и 2, не позволяют учесть такие крайне важные технологические характеристики, как количество продувочных узлов и их расположение в днище ковша, количество и размер диспергированных пузырьков газа, скорость их подъема и скольжения в параллельно текущей жидкой фазе, продолжительность контактирования, характеристики расширения (газовых пузырьков), особенно под воздействием компонентов расплава, которые могут выделяться из ванны в виде газа. Следовательно, эти выражения могут применяться в основном для предварительной сравнительной оценки, позволяющей получать в большей степени качественные выводы и требующей уточнений применительно к конкретным технологическим проектам.

Целью настоящей работы было получение оригинальных зависимостей для оценки эффективности перемешивания расплава на установке ковш-печь с помощью физического моделирования и последующей математической обработки полученных количественных результатов. В качестве показателя эффективности перемешивания жидкости в ковше было использовано время гомогенизации, под которым подразумевался некоторый временной период, необходимый для достижения соответствующей высокой химической однородности системы, регламентируемой технологическими соображениями.

Физическое моделирование выполнялось на прозрачной модели сталеразливочного ковша, выполненной с учетом критериев гидродинамического, временного и геометрического подобия, что позволило также визуализировать все основные гидродинамические процессы, происходящие при продувке жидкости. Учитывая тот факт, что при вдувании газа в жидкость весьма важными представляются процессы, происходящие под действием сил тяжести, определяющих всплытие пузырьков газа, и сил инерции, определяющих развитие системы циркуляционных потоков в жидкой ванне ковша, то в качестве базовых критериев подобия были приняты критерий Фруда и критерий гомохронности [10]. Геометрический масштаб физической модели с учетом указанных критериев составил 1:8 и 1:12 по отношению к выбранным моделируемым объектам – ковшам вместимостью 60 и 110 т соответственно. Геометрические размеры емкости, имитирующей сталеразливочный ковш, были выбраны следующими: диаметр - 0,24 м, высота - 0,36 м.

В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовали воду при температуре 18-25 °С. Выбор воды в качестве моделирующей жидкости объясняется тем фактом, что значения вязкости воды и стали в области температур внепечной обработки достаточно близки друг к другу. Жидкость перемешивалась сжатым воздухом, подаваемым через днище ковша. Для визуального наблюдения газожидкостных потоков стенки модели ковша были выполнены из прозрачного стекла (рис. 1, а). Наблюдаемые процессы перемешивания фиксировались с помощью цифровой видеокамеры.

В большинстве исследуемых ситуаций (один продувочный узел) поток вдуваемого газа вертикально внедряется в жидкость через входное отверстие продувочного узла. По мере продвижения пузырьков газа вверх образуется расширяющаяся зона газожидкостного потока, в которую подсасываются все новые объемы жидкости. В верхней части жидкой ванны двухфазный поток изменяет направление своего движения с вертикального на горизонтальное (вдоль зеркала). При этом большая часть пузырьков (до 85-90 %) покидает жидкую ванну. При смещении продувочного узла к стенке ковша наблюдается формирование устойчивых циркуляционных потоков (рис. 2) с высокой транспортирующей способностью. Такие циркуляционные потоки, проходя вдоль горизонтальной поверхности жидкости, трансформируются в вертикальные нисходящие. Соответственно, эти макроскопические циркуляционные потоки обеспечивают интенсивное перемешивание по всему объему ковша.

Время гомогенизации объема жидкости измеряли с помощью электрохимического метода путем ввода в перемешиваемую жидкость (воду) 5 мл концентрированного раствора поваренной соли и измерения электропроводности в двух точках объема модели [8, 11]. Порядок измерений реализовывался следующим образом (рис. 1, б). Электропроводность измеряли двумя датчиками 7, каждый из которых представлял собой два

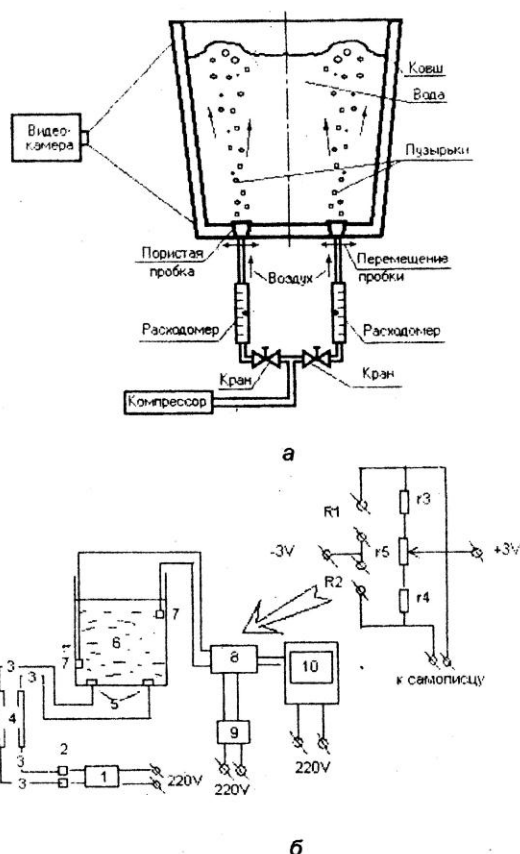


Рис. 1. Схематическое представление лабораторной установки для изучения процессов перемешивания жидкости в ковше: 1 - компрессор; 2 - узел регулировки подачи воздуха; 3 - трубопровод; 4 - блок измерения параметров вдуваемого воздуха (расход, давление); 5 - продувочные узлы; 6 - модель ковша; 7 - датчики измерения электропроводности воды; 8 - мостовая схема; 9 - стабилизированный блок питания; 10 - самописец

платиновых электрода. Датчики измерений электропроводности располагались в диаметрально противоположных точках у стенок модели ковша на уровне 0,2 и 0,8 глубины ванны и подключали по мостовой схеме. Преимуществом такой схемы является то, что выходной сигнал представляет собой разность между показателями датчиков, а следовательно, позволяет более точно судить о том, в какой степени осуществилась гомогенизация электролита в объеме модели.

Полученные осциллограммы оцифровывались с использованием специального программного обеспечения, а величина времени гомогенизации определялась как отрезок осциллограммы, на котором изменение параметра превышало 2 % от максимального сигнала, соответствующего начальному моменту попадания вводимого электролита на один из датчиков (рис. 3).

В процессе исследований солевой раствор подавали как в центр модели ковша, так и в зону одного из датчиков. Сравнение результатов измерений по обоим способам показало, что величина времени гомогенизации в обоих случаях была практически одинакова. В дальнейшем для удобства выполнения процедуры измерений электролит подавал-

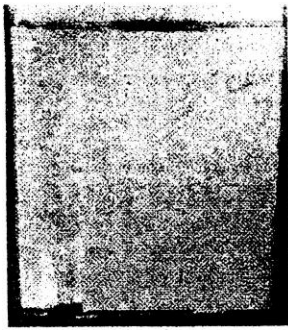


Рис. 2. Характер движения газожидкостного потока при смещении продувочного узла к стенке ковша

ся непосредственно к одному из датчиков, так как в этом случае величина отклонения сигнала на изменение концентрации соли в воде несколько выше, чем при подаче солевого раствора в центр ковша. Измерение времени гомогенизации для каждого конкретного случая производилось не менее трех раз, а в случае, когда значение одного из трех замеров отличалось от двух других более чем на 10 %, серия измерений повторялась. Окончательно время перемешивания определено как среднее арифметическое значение между полученными величинами.

На основании полученных экспериментальных данных (свыше 150 замеров) была выполнена сравнительная оценка точности известных расчетных зависимостей (табл. 2) применительно к условиям физического моделирования, описанного в настоящей статье. Как видно из данных, представленных на рис. 4, выражения для

расчета времени перемешивания исследователей Nakanishi и других (формула № 1, табл. 2), а также Sinha и McNallan (формула № 3, табл. 2) дают значения, превышающие экспериментальные более чем в 8-10 раз (графики не представлены на рис. 4) для любых формул расчета интенсивности перемешивания (табл. 1). При использовании зависимостей исследователей Themelis и Staturewicz (формула № 1, табл. 1), Nakanishi и других (формула № 4, табл. 1), а также Sandberg (формула № 5, табл. 1) для расчета интенсивности перемешивания наиболее близкие результаты к экспериментальным дает выражение для времени перемешивания исследователей Themelis и Staturewicz (формула № 4, табл. 2). При этом средние отклонения расчетных и экспериментальных значений соответственно составляют 9,5; 34,6 и 20,7 %. При использовании зависимости Sinha и McNallan (формула № 2, табл. 1) для расчета интенсивности перемешивания наиболее близкие к экспериментальным результатам дает выражение для времени перемешивания исследователей Asai и других (формула № 2, табл. 2). Среднее отклонение при этом соответственно составляет 9,8 %. А при применении зависимости Krishnamurthy и других (формула № 3, табл. 1) для расчета интенсивности перемешивания наименьшие отклонения (12,2 %) получены для выражения времени перемешивания исследователей Mazumdar и Guthries (формула № 5, табл. 2).



Рис. 3. Типичный вид оцифрованной осциллограммы

Таким образом, в результате выполненных исследований показано, что ни одна из известных эмпирических зависимостей не может быть использована для условий физического моделирования, соответствующих процессам внепечной обработки стали в ковше, по следующим причинам: известные из литературных источников выражения не учиты-

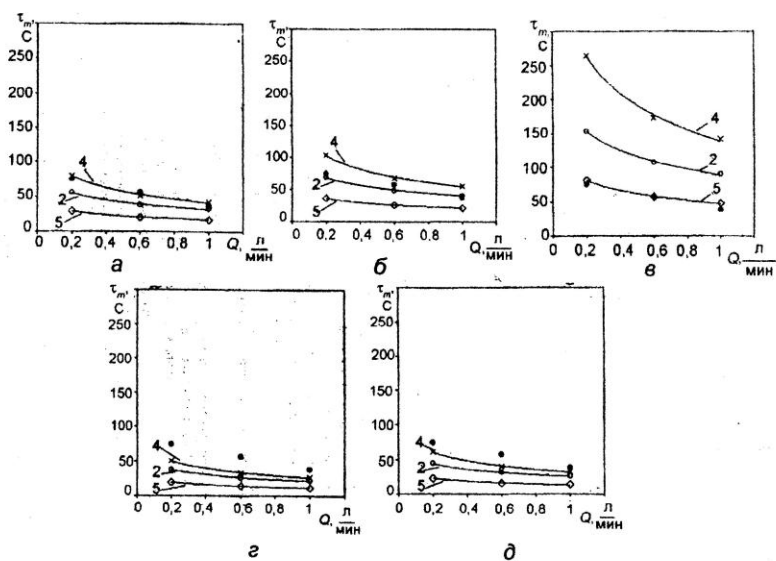


Рис. 4 Сравнение экспериментальных и расчетных значений времени гомогенизации при использовании разных формул для интенсивности перемешивания: а - № 1; б - № 2; в - № 3; г - № 4; д - № 5 (номера формул соответствуют номерам в табл. 1); 2, 4, и 5 (соответствуют номерам формул в табл. 2; □ - экспериментальные данные

вают расположение продувочного узла в днище ковша; значительные неудобства в использовании всех известных выражений для τ_m доставляет необходимость предварительного определения значения интенсивности перемешивания ε_m , которая при расчете по различным рекомендуемым выражениям изменяется в весьма широких пределах, что соответственно снижает точность выполняемых расчетов; противоречивость или полное отсутствие рекомендаций по влиянию уровня налива жидкости в ковше на время перемешивания.

Список литературы

1. Stolte G. Secondary Metallurgy Fundamentals. Processes. Applications // Stahl und Eisen. - 2002. - № 3. - 216 p.
2. Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Дорохова Л. В. и др. Металлургические мини-заводы. - Донецк: Норд-пресс, 2005. - 469 с.
3. The making, shaping and treating of steel / Editor R.J.Fruehan. - Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998. - 767 p.
4. Дюдкин Д. А., Бать С. Ю., Гринберг С. Е., Маринцев С. Н. Производство стали на агрегате ковш-печь. - Донецк: Юго-Восток, 2003. - 300 с.
5. Khakhar D.V., Rising H., Ottino J.M. Analysis of chaotic mixing in two model systems // Journal of Fluid Mechanics. - 1986. - V.172. - P. 419-451.
6. Стрэнк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. - Л.: Химия, 1975. - 384 с.
7. A Comparison of experimentally measured and theoretically calculated velocity fields in water model of an argon stirred ladle / O.J.Ilegbusi, J.Szekely, M.Iguchi e.a. // ISIJ International. - 1993. - V. 33, № 4. - P. 474-478.
8. Ефименко С. П., Пилюшенко В. Л., Смирнов А. Н. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. - М.: Металлургия, 1989. - 168 с.
9. Mazumbar D., Guthrie R.I.L. The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle system // ISIJ International. - 1995. - V. 35, № 1. - P. 1-20.

10. Кутателадзе С.С. Анализ подбоя и физические модели. - Новосибирск: Наука, 1986. - 294 с.
11. Figliola R.S., Beasley D.E. Theory and Design for Mechanical Measurements. - New York: John Wiley & Sons, 2005. - 560 p.

Поступила 17.07.2007

УДК 669.715.018

Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. И. Белик, В. М. Дука

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВОДОРОДНОЕ РАФИНИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ОТ ТВЕРДЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Недостатками наиболее распространенных существующих методов рафинирования алюминиевых сплавов являются зависимость удаления твердых неметаллических включений (ТНМВ) от случайного характера встречи с ними газовых пузырьков или частиц флюса, а также неконтролируемое удаление мелкодисперсных ТНМВ, выполняющих полезную роль центров кристаллизации. Для устранения этих недостатков предложен комбинированный метод рафинирования, включающий на первом этапе удаление крупной фракции ТНМВ путем водородного пересыщения расплава, а на втором этапе - снижение содержания водорода известными эффективными методами.

Недоліками найбільш поширених існуючих методів рафінування алюмінієвих сплавів є залежність видалення твердих неметалевих включень (ТНМВ) від випадкового характеру зустрічі з ними газових бульбашок або частинок флюсу, а також неконтрольоване видалення мілкодисперсних ТНМВ, які виконують корисну роль центрів кристалізації. Для ліквідації цих недоліків запропонований комбінований метод рафінування, який включає на першому етапі видалення крупної фракції ТНМВ шляхом водневого пересичення розплаву, а на другому етапі - зниження вмісту водню відомими ефективними методами.

The most extended existing methods of aluminum alloys refining have such deficiencies like dependence of solid non-metal inclusions (SNMI) on random character of meeting with gas bulbs or flux parts, and uncontrolled remove of fine-dispersed SNMI that have useful function of solidification centers. For remove of these deficiencies the combined method is proposed. It includes the remove of SNMI gross fraction by melt supersaturation with hydrogen on the first stage and the following hydrogen remove using the known methods, on the second stage.

Наиболее широко используемые методы рафинирования алюминиевых сплавов путем продувки газом, фильтрации и обработки флюсами имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Так, при существенном удалении водорода продувка газами малоэффективна по отношению к твердым неметаллическим включениям (ТНМВ) из-за случайного характера встречи всплывающего газового пузырька с ТНМВ. Большая степень очистки от ТНМВ достигается при фильтровании расплава через зернистые и керамические фильтры, а также при обработке рафинирующими флюсами. Однако применение фильтрования ограничено из-за сложности управления расходными гидравлическими характеристиками, что обусловлено спонтанной частичной закупоркой проходных сечений каналов фильтров частичками включений. Кроме того, использование фильтров в определенной мере усложняет конструкцию литейной оснастки и ее обслуживание. Что же касается механизма рафинирования флюсами, то он также построен на случайном