

ТЕПЛОВАЯ, ЗВУКОВАЯ И МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ

ПРОХОРЕНКО Виктор¹, БЫЛИЦА Анджей¹, ПРОХОРЕНКО Сергей²

¹ Жешувский педагогический университет. Институт техники.

² Государственный университет «Львовская политехника».
Информационно-измерительная техника.

Абстракт

Физическая теория и диффракционные эксперименты убедительно подтвердили наличие в металлических расплавах микрогетерогенной структуры. Микрогетерогенность обусловлена химической и топологической неоднородностью кластерного типа. Такое неравновесное состояние расплава может быть переведено в равновесное путём технологической обработки расплава тепловым, магнитным или звуковым полем. Это будет содействовать получению литья высокого качества. Физические модели взаимодействия указанных полей с расплавом и технологические достижения температурно-временной, магнитной и низкочастотной звуковой обработки расплавов – описаны в представленной работе.

1. Микрогетерогенная модель строения металлических расплавов.

Существуют физические модели, достаточно адекватно описывающие строение твёрдого тела и газа. Однако следует отметить, что жидкость, занимая промежуточное положение между газом и твердым телом, обладает несравненно более сложным строением. В жидкости роли трансляционного и колебательного движений частиц соразмерны. Это обстоятельство сильно усложняет теорию жидкого состояния.

Одним из наиболее очевидных свойств жидкости является её текучесть. Механические свойства жидкостей и газов описываются одними уравнениями гидродинамики, а теория Ван дер Ваальса успешно описывает непрерывный переход между жидкостью и газом. Поэтому исторически первыми возникли

квазигазовые модели жидкости, которые успешно решают многие вопросы при температурах, близких к критическим.

Однако для жидких металлов наиболее интересна область не слишком удаленная от кристаллизации, поскольку металлургические процессы протекают при температурах, не более, чем на 15% превышающих температуру плавления. А в этой области металлические расплавы по многим физическим свойствам мало отличаются от кристаллических металлов.

В настоящее время наиболее распространенными и наиболее объективными остаются диффракционные методы изучения структуры расплавов. Однако общепринятая теория рассеяния рентгеновских лучей анализирует только когерентную часть рассеяния, - поэтому рентгенография жидкости даёт интегральную информацию о парных корреляциях и не позволяет анализировать индивидуальные трансляционные движения атомов, а также высшие корреляции.

Атомная трансляционная динамика (представленная автокорреляционными функциями) описывается некогерентным рассеянием рентгеновских лучей или тепловых нейтронов. Успехи физической теории и экспериментов по некогерентному рассеянию нейтронов убедительно подтверждают наличие в металлических расплавах флуктуаций плотности, топологическую и химическую микрогетерогенность [1, 2].

Размеры более упорядоченных группировок (кластеров) вблизи температуры кристаллизации составляют по различным оценкам от 10^{-9} м до 10^{-8} м. Статистический вес и размеры кластеров весьма существенны вблизи кристаллизации и уменьшаются по мере нагревания расплава. Другими словами – в различных моделях микрогетерогенности речь идёт о *неравновесном* состоянии расплавов, из чего следует необходимость поиска технологических путей *приближения к равновесному состоянию*. Приведение металлического расплава в равновесное состояние во многих случаях является одним из важнейших условий получения качественного литья.

2. Тепловременная обработка расплавов

По определению, неравновесные системы неустойчивы и должны перейти в равновесное состояние. Однако согласно соотношениям Онсаггера – скорость такого перехода вблизи положения равновесия сильно замедляется. Наиболее медленно переходы реализуются в кооперативных системах и процессах. Жидкие металлы являются кооперативными системами, соответственно процессы диффузии, вязкости, и вообще – массопереноса – также являются кооперативными. Частицы жидкости (атомы, или ассоциаты) размещены хотя и нерегулярно, однако весьма плотно, и перемещение одной захватывает в процесс целую совокупность частиц, что требует определённого времени.

Не вызывает сомнения, что время релаксации особенно велико в микронеоднородных расплавах. В этом случае установление термодинамического равновесия может быть ускорено внешним энергетическим воздействием. При

этом наиболее простым методом перевода расплава в равновесие представляется дополнительный его нагрев до некоторой определённой (пороговой) температуры. Пороговый характер перехода системы в равновесие свидетельствует о кинетическом, а не диффузионном режиме процесса: процесс лимитирует не миграция частиц, а их отрыв от неравновесного образования. То есть – речь идёт о разрушении кластера, на что требуется достаточно высокая энергия.

Установление равновесия системы в определённом температурном интервале проявляется ветвлением политемпературно-чувствительных свойств в процессах нагревания – охлаждение расплава. Например – политемпературные поверхностного натяжения и вязкости сложнелегированных сталей после нагревания расплава до температуры 1750÷1800°C в процессе последующего охлаждения лежат выше, чем при процессе первичного нагревания (рис. 1). На рекомендациях по термовременной обработке расплавов разработаны новые технологии, обеспечивающие формирование однородной структуры расплава и, соответственно, – стабильность улучшенных характеристик выплавляемых сталей. Изменение структуры литого металла вследствие получения равновесного расплава положительно сказывается и на его служебных характеристиках. На 20÷40% повышается пластичность сталей, на ≈30% возрастают упругие свойства. Для нержавеющей сталей – установлен рост их долговечности на 20÷50% и повышение коррозионной стойкости в 3÷4 раза [3].

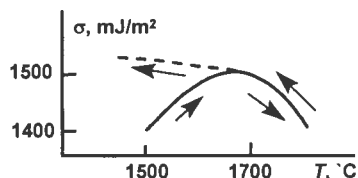


Рис. 1. Температурная зависимость поверхностного натяжения сплава Fe-Ni-Cr

Fig. 1. Temperature dependence of a superficial tension of an alloy Fe-Ni-Cr

3. Магнитная обработка расплавов

В производственных условиях кристаллизация почти всегда упреждается естественной тепловой конвекцией во всём объеме расплава. Степень интенсивности тепловой конвекции определяется критериями Грасгофа N_{Gr} и Прандтля N_{Pr} [4]:

$$N_{Gr} = g \cdot L^3 \beta_T \Delta T / \nu^2 \quad (1)$$

$$N_{Pr} = c' \mu / K_L \quad (2)$$

где – g – ускорение силы тяжести; L – характеристическая длина системы; β_T – объёмный коэффициент теплового расширения жидкости; ΔT – градиент температур; ν – кинематическая вязкость расплава; c' – удельная теплоёмкость; μ – динамическая вязкость; K_L – коэффициент теплопроводности жидкости. Произведение критериев Грасгофа и Прандтля называется критерием Релея N_{Ra} , который характеризует отношение подъемной силы к силам вязкости в жидкости.

В реальных металлических расплавах ламинарный поток существует при значениях $N_{Ra} \leq 10^8$; выше этого значения поток будет турбулентным.

Интенсивную конвекцию вызывают весьма незначительные градиенты температуры, обусловленные тепловыделением и теплоотводом вблизи фронта кристаллизации – микромассоперенос в приграничном слое, перпендикулярный к фронту кристаллизации, будет крайне турбулентным [4]. Важным следствием указанного вида конвекции являются температурные флуктуации у фронта кристаллизации (рис. 2). Флуктуации появляются в условиях, когда градиент температуры ≥ 1 К/см. При свойственным металлическим расплавам высоким значением критерия Реллея – колебания температур всегда беспорядочны и отражают, по-видимому, турбулентность потока массы в приграничном слое. В результате будет флуктуировать и состав новообразованных кристаллических слоев, что и проявляется в виде полос на микроструктуре протравленных образцов.

Наведение магнитного поля на область фронта кристаллизации подавляет конвекцию, что проявляется в устранении флуктуации температуры. Движение проводящей жидкости через силовые линии магнитного поля затухает из-за индуктивного торможения. Согласно Флеммингсу- это торможение можно рассматривать как магнитную вязкость, которая превалирует в случае, если критерий Гартмана $M \gg 1$:

$$M = B \cdot L \cdot (\sigma / \mu)^S \quad (3)$$

где B - напряженность магнитного поля; L - характеристическая длина системы; σ - электропроводность и μ - динамическая вязкость.

Экспериментально установлено [5], что электросопротивление жидких металлов при наложении электромагнитного поля не только принципиально изменяется по абсолютной величине, но также содержит на температурной зависимости $\rho(T)$ дополнительные сингулярности (рис.3). Хотя корректная физическая теория, объясняющая магнетосопротивление жидких металлов и отсутствует, наличие немонотонности в высокотемпературной области $\rho_H(T)$ объясняется определёнными структурными изменениями. Логично связать наличие этого эффекта

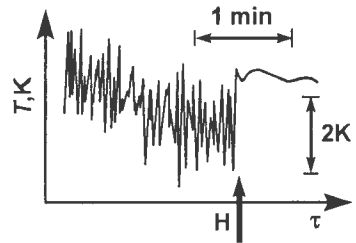


Рис. 2. Флуктуация температуры в жидкой фазе у фронта кристаллизации в результате термической конвекции

Fig. 2. Temperature fluctuation in a liquid phase at front of crystallization in result of thermal convection.

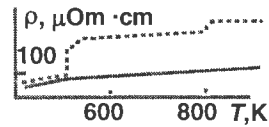


Рис. 3

Температурная зависимость электросопротивления сплавов Bi+80%Ga.

(-- H=0 кЭ; -- H=18 кЭ)

Fig. 2. Temperature dependence of electroconductivity of a Bi+80%Ga alloys.

с переходом от микрогетерогенного к гомогенному строению расплава. Данное допущение вполне согласуется с успехами электромагнитной обработки расплавов в процессе кристаллизации.

4. Звуковая обработка расплавов

До недавнего времени под воздействием на расплав упругих колебаний подразумевалась преимущественно ультразвуковая обработка среды. Последнее обусловлено тем обстоятельством, что использование высоких частот позволяет создать в расплаве высокую плотность потока звуковой волны, то-есть колебания большой интенсивности, вызывающие необратимые изменения в структуре среды. Известно, что обработка расплава ультразвуковыми колебаниями оказывает влияние на формирование кристаллической структуры, подобное предварительному перегреву расплава, или введению модификатора. Поэтому можно предполагать, что введение звуковой энергии, как и предварительный перегрев, приближает расплав к равновесному состоянию, тем самым оптимизируя условия кристаллизации.

Основной недостаток высокочастотной обработки состоит в быстром затухании ультразвука в расплаве. Поэтому в последние годы возрастающее число публикаций относится к изучению возможностей влияния на расплав колебаний звуковых частот. Звуковой излучатель, погружённый в тигель с расплавом, работает по принципу гармонически колеблющегося поршня, создавая в расплаве упругую плоскую волну – переменное движение частиц и переменный поток в направлении распространения звука. Решения волнового уравнения позволяет получить основные характеристики звукового поля: смещение частиц, колебательную скорость, ускорение, звуковое давление, интенсивность. Интенсивность звука, определяющая плотность потока энергии, следующим образом связана с характеристиками звукового поля:

$$I = (2\rho c \cdot \theta^2 A^2)^{-1} = (2\rho c \cdot v^2)^{-1} \quad (4)$$

где: – ρ - плотность среды; c - скорость звука в среде, θ - угловая частота; A - амплитуда смещени частиц; v - скорость колебательного смещения частиц среды.

Таким образом, интенсивность звука пропорциональна не только квадрату частоты, но также и квадрату амплитуды смещения. Отсюда следует, что высокую интенсивность звука можно получить и на низких частотах имея мощный генератор. Достаточно высокую энергию звука на частотах около 100 Гц обеспечит амплитуда смещения 1÷2 мм, создаваемая генератором вполне достижимой мощности в ≈1кВт.

Воздействие низкочастотной звуковой обработки в режиме кавитации на предкристаллизационное состояние расплавов на основе алюминия изучалось в [6] методом дифференциального термического анализа. Для алюминия и сплавов на

его основе – область метастабильности существенно, на 5+6К, уменьшается после кавитационной обработки. Это может быть объяснено повышением однородности расплава. Установлено, что озвучивание расплава способствует измельчению микроструктуры и структурных составляющих закристаллизованных сплавов. Улучшение структуры литого металла, вызываемое кавитационной обработкой, влечёт за собой существенное улучшение рабочих свойств (в частности – предел прочности сплавов увеличивается на 30+35%).

В работе [7] изучалось влияние виброобработки (частота 30Гц и амплитуда волны – 4мм) на вязкость литейного чугуна промышленной плавки (3.4%С; 1.8%Si; 0.95%Mn; 0.13%Cr; 0.05%P; 0.03%S). Политерма вязкости (①) при нагревании жидкого чугуна располагается существенно выше политермы вязкости (②) и (③), полученной при последующем охлаждении (рис.4), в полном соответствии с описанным в разделе 2 (“Тепловременная обработка расплавов”) статьи механизмом приведения расплава в равновесное состояние. Однако виброобработка перегретого расплава повышает вязкость (④) в передкристаллизационный период. Приведенные данные также свидетельствуют о наличии неоднородности расплава, однако действие температуры перегрева и виброобработки – неодинаковы.

Предполагается [7], что виброобработка расплава, перегретого выше температуры ликвидус на 150+200К, также способствует трансформации весьма нестабильных микрогруппировок кластерного типа, однако не путём их дальнейшего теплового размывания, а наоборот – путём их коагуляции по турбулентному механизму.

В этом приближении исходный расплав рассматривается как молекулярно-дисперсная система, в которой кластеры представлены как взвешенные частицы. В такой системе возможно протекание коагуляции на основе соотношения броуновского движения и турбулентной коагуляции, спровоцированной звуковой волной. Критерием эффективности воздействия (β) принимается отношение числа актов коагуляции по турбулентному механизму ($N_{\text{ТУРБ}}$) к числу актов коагуляции, вызванных броуновским движением ($N_{\text{БР}}$):

$$\beta = N_{\text{ТУРБ}} / N_{\text{БР}} \approx (\epsilon_0 / \nu)^S \times a^2 / 4D_{\text{БР}} \quad (5)$$

где ϵ_0 - энергия диссипации, определение которой требует численного моделирования гидродинамики расплава при вибровоздействии; $D_{\text{БР}}$ - коэффициент диффузии, который можно оценить из формулы Эйнштейна:

$$D_{\text{БР}} = k_B T / 3\pi\eta a \quad (6)$$

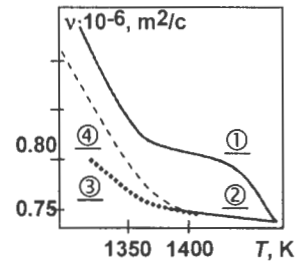


Рис. 4. Влияние виброобработки на литейный чугун.

Fig. 4. Influence of vibrating processing on foundry pig-iron.

где k_B - постоянная Больцмана.

Расчёт по (5) показал, что минимальный размер частиц, подверженных вибровоздействию в рамках турбулентной модели, составляет 10^{-8} м, что качественно согласуется с размером кластеров в металлических расплавах (1-10 нм).

Слияние кластеров и увеличение разупорядоченной зоны имели следствием снижение вязкости. Вместе с тем коагуляция приводит к возрастанию концентрации жизнестойких зародышей (больших критического размера), что и определяет измельчение зерна и сферизацию графитовых включений при кристаллизации. Последнее определяет существенное возрастание предела прочности, твёрдости и трещиностойкости.

Таким образом низкочастотная обработка расплавов существенно улучшает рабочие свойства сплавов и этот эффект вполне может быть объяснен убедительными физическими моделями.

Литература

- [1] *Prochorenko V.* Electric conductivity and atomic dynamic in liquid metals. Soviet Physics Uspieki. 1975. **18**, ?3. ?251-257.
- [2] *Soltwisch M., Quitmann D., Ruppertsberg H., Suck J.B.* Dynamics of concentration fluctuations in a heterocoordinated binary liquid alloy. Phys. Rev.(b). 1983. V.28. N10. P.5393-5394.
- [3] *Baum B.A.* Metalliciscije zidkosti. M.Nauka. 1986
- [4] *Flemings M.C.* Solidification Processing. New York, 1974
- [5] *Magomedow A.M.* Elektrosoprotiwlenije metallicheskich rasplawow w magnitnom pole. VII Konf. Strojenje i swojstwa metallicheskich i szlakowych rasplawow. Czeljabinsk 1990. T II/II, s. 193–195.
- [6] *Pastuchow E.A.*, Sb. naucz. trudow «Fiziceskaja himija i tehnologija w metalurgiji ». Jekaterinburg. 1996. s. 121-131.
- [7] *Wiszkariow A.F.* Sb. naucz. trudow “Wzaimoswjaz zidkogo i twiordogo sostojanij“. Soczi. 1991. s. 108-113.

Recenzent: prof. W. Orłowicz