

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Реферат. В данной статье для контроля вязкости расплавленного металла предложен бесконтактный метод измерения коэффициента затухания ультразвуковых волн. Данные, полученные с помощью разработанного математического аппарата, проверены экспериментальным путем. В статье приведена принципиальная схема установки для оценки параметров разработанной математической модели.

При изготовлении цельнолитых изделий сложной формы из стали и её сплавов, а также в процессе непрерывной разливки стали важной задачей является контроль вязкости стали, находящейся в расплавленном состоянии. Это связано с контролем достижения сплавом необходимой жидкотекучести для: равномерного заполнения формы при минимальных затратах энергоносителей на разогрев сплава в случае цельнолитых изделий; избегания преждевременного износа кристаллизатора, испытывающего давление при контакте с потоком расплавленного металла в случае непрерывной разливки стали [1]. Наиболее распространенными на данный момент методами такого контроля являются ротационная и вибрационная вискозиметрия. Но использование указанных методов в описанной ситуации сопряжено с рядом трудностей, основной из которых является непосредственный контакт чувствительного элемента вискозиметров с агрессивной средой, ведущий к его преждевременному износу. Поэтому актуальной проблемой является разработка бесконтактного метода экспресс - контроля вязкости.

Необходимо исследовать возможность бесконтактного экспресс - контроля вязкости расплава, анализируя скорость распространения сдвиговых (поперечных) ультразвуковых волн, либо степень осцилляции (коэффициент затухания) ультразвука. Продольные ультразвуковые волны характеризуют упругие свойства жидкостей, их структуру и силы межмолекулярного отталкивания, сдвиговые – вязкие свойства, и как следствие, силы межмолекулярного притяжения.

Расплавленные металлы имеют вязкость того же порядка, что и обычные жидкости [3]. В жидкостях, где расстояния между молекулами много меньше, чем в газах, вязкость обусловлена в первую очередь межмолекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при образовании в нём полости, достаточной для перескакивания туда молекулы. На образование полости (на «рыхление» жидкости) расходуется так называемая энергия активации вязкого течения. Энергия активации уменьшается с ростом температуры и понижением давления. В этом состоит одна из причин резкого снижения вязкости жидкостей с повышением температуры и роста её при высоких давлениях.

Строгая теория вязкости жидкостей, в связи с недостаточной разработанностью теории жидкого состояния, ещё не создана. На практике широко применяют ряд эмпирических и полумпирических формул, достаточно хорошо отражающих зависимость вязкости отдельных классов жидкостей и растворов от температуры, давления и химического состава.

В основе предлагаемого способа экспресс-контроля лежит измерение акустических характеристик исходного сырья (коэффициент поглощения, скорость ультразвука) методами молекулярной акустики, раздела физической акустики, в котором свойства вещества и кинетика молекулярных процессов исследуются акустическими методами.

По скорости звука можно определить такие характеристики вещества, как сжимаемость, отношение теплоёмкостей, упругие свойства твёрдого тела и др., а по поглощению звука — значения сдвиговой и объёмной вязкости, время релаксации и др. [1-3]. В жидкости, вычисляя скорость звука на основании той или иной модели жидкости и сравнивая результаты расчёта с опытными данными, в ряде случаев можно оценить правдоподобность используемой модели и определить энергию взаимодействия молекул. На скорость звука влияют особенности молекулярной структуры, силы межмолекулярного взаимодействия и плотность упаковки молекул.

При наличии релаксационных процессов энергия поступательного движения молекул, которую они получают в звуковой волне, перераспределяется на внутренние степени свободы. При этом появляется дисперсия скорости звука, а зависимость произведения коэффициента поглоще-

ния на длину волны от частоты имеет максимум на некоторой частоте, называется частотой релаксации. Величина дисперсии скорости звука и величина коэффициента поглощения зависят от того, какие именно степени свободы возбуждаются под действием звуковой волны, а частота релаксации, равная обратному значению времени релаксации, связана со скоростью обмена энергией между различными степенями свободы. Таким образом, измеряя скорость звука и поглощение в зависимости от частоты и определяя время релаксации, можно судить о характере молекулярных процессов и о том, какой из этих процессов вносит основной вклад в релаксацию. Этими методами можно исследовать возбуждение колебательных и вращательных степеней свободы молекул в жидкостях, процессы столкновения молекул, перестройку молекулярной структуры в жидкостях, процессы сдвиговой релаксации в очень вязких жидкостях и полимерах, и др.

В молекулярной акустике для исследований обычно применяется ультразвук. Это связано как с высоким развитием техники излучения и приёма ультразвука и с большой точностью измерений в этом диапазоне частот, так и с тем, что работа на более низких частотах потребовала бы очень больших объёмов исследуемого вещества, а на более высоких частотах поглощение звука становится столь большим, что многие акустические методы оказываются неприменимыми.

Одним из существенных преимуществ ультразвуковых колебаний высокой частоты перед звуковыми является то, что их можно посылать в виде мало расходящихся пучков лучей. Это обеспечивает возможность направленного излучения и приёма. Известно, что чем больше диаметр излучающей пьезопластины по сравнению с длиной волны, тем выше направленность излучения. Например, для обеспечения на частоте 1 Мгц излучения в виде пучка лучей с углом расхождения не превышающим 10° (0,2 рад) достаточно выбрать диаметр пьезоэлемента равным 20 мм.

Частоты применяемого ультразвука в жидкостях и твёрдых телах — в диапазоне 10^5 — 10^8 гц. Поглощение звука, превращение энергии звуковой волны в другие виды энергии, и в частности в тепло; характеризуется коэффициентом поглощения α , который определяется как величина, обратная расстоянию, на котором амплитуда звуковой волны уменьшается в $e = 2,718$ раз. α выражается в см^{-1} т. е. в неперах на см или же в децибелах на м ($1 \text{ дб/м} = 1,15 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$). Поглощение звука характеризуют также коэффициент потерь

$$e = \alpha l/p,$$

(где l — длина волны звука) или добротностью $Q = l/e$. Величина αl называется логарифмическим декрементом затухания. При распространении звука в среде обладающей вязкостью и теплопроводностью,

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho \cdot c^3} \left[\frac{4}{3} \cdot \eta + \zeta + \chi \cdot \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right], \quad (1)$$

где ρ — плотность среды, C — скорость звука в ней, ω — круговая частота звуковой волны, h и χ — коэффициент сдвиговой и объёмной вязкости соответственно, c — коэффициент теплопроводности, C_p и C_v — теплоёмкости среды при постоянном давлении и объёме соответственно. Если ни один из коэффициентов h , χ и c не зависит от частоты, что часто выполняется на практике, то $\alpha \sim \omega^2$. Если при прохождении звука нарушается равновесное состояние среды, поглощение звука оказывается значительно большим, чем определяемое по формуле (1). Такое поглощение называется релаксационным и описывается формулой:

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot C_0^3} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau \cdot (C_\omega^2 - C_0^2)}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (2)$$

где τ — время релаксации, c_0 и c_ω — скорости звука при $\omega \tau \ll 1$ и при $\omega \tau > 1$ соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. В. Линчевский, Техника металлургического эксперимента, «Металлургия», М., 1967 - 239.
2. А. М. Коваленко, И. А. Новохатский, Г. С. Ершов, А. К. Петров, Изв. АН СССР. Металлы, № 6, 1969.

3. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.