



The problem of application of ultrasonic effect on the melt for achievement of controllable influence on micro- and macrostructure of castings of different metals and alloys is reflected.

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. А. ХАРЬКОВ, А. П. ПОПЕЛУШКО,
И. О. САЗОНЕНКО, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.047

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Металлургические процессы являются одними из самых сложных технологических процессов, используемых в промышленности. В той или иной мере в этих процессах участвуют три вида агрегатного состояния вещества (твердое, жидкое и газообразное), а на границе раздела этих фаз происходят различные физико-химические превращения. Учитывая сложность явлений, происходящих как в самом расплаве, так и при его взаимодействии с окружающей средой, необходимо рассматривать металлургические процессы как сложную физико-химическую систему, на которую можно воздействовать многими способами.

Под воздействием на обрабатываемую среду (физико-химическую систему) принято понимать направленное проявление сил различных физических полей: механических, электрических, магнитных, тепловых, акустических и радиационных [1].

Воздействие всегда направлено на некоторый материальный объект, которым может быть отдельный элемент или совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную систему. Результаты воздействия – это физико-химические эффекты, проявляющиеся в элементах системы, на которые направлены определенные воздействия.

В металлургических процессах традиционно используются практически все виды энергетических воздействий: тепловые, механические, электрические, магнитные, радиационные, химические, акустические.

Тепловое воздействие является основным – все металлургические процессы связаны с подводом и отводом теплоты в процессе плавления и затвердевания металлов. С помощью химического воздействия из соответствующих оксидов получают металлы и производят их очистку от примесей за счет протекания окислительно-восстановительных

реакций. Механическое воздействие применяется в основном для перемешивания расплавов, интенсификации процесса усреднения химического состава в объеме плавильного пространства. Широко также применяется электрическое, магнитное и совмещенное электромагнитное воздействие, но в большинстве случаев результатом этого воздействия является трансформация электромагнитной энергии в тепловую или механическую (выделения теплоты в дуговых, индукционных и печах сопротивления, электромагнитное перемешивание в различных плавильных агрегатах). Радиационное воздействие в металлургии используется в установках электроннолучевой плавки и в различных системах контроля уровня металла (в последнем случае воздействие носит характер скорее информационного, чем силового).

Применение акустического воздействия в металлургии в основном связано с попытками добиться контролируемого влияния на макро- и микроструктуру отливок из различных металлов и сплавов. Акустическое воздействие представляет собой распространение в обрабатываемой среде упругих или квазиупругих колебаний [2]. Акустические колебания условно делятся на инфразвуковые (частота $f < 20$ Гц), звуковые ($20 \text{ Гц} \leq f \leq 20 \cdot 10^3$ Гц), ультразвуковые ($20 \cdot 10^3 \text{ Гц} < f \leq 20 \cdot 10^8$ Гц), гиперзвуковые ($f > 20 \cdot 10^8$ Гц). Для применения в металлургии наиболее часто используются колебания с частотами звукового и ультразвукового диапазонов.

Физические принципы обработки жидких металлов ультразвуком высокой интенсивности базируются на тех же главных закономерностях, которые справедливы для низкотемпературных жидкостей (вода, водные растворы, органика и др.) [3]. Однако высокая температура жидкого металла, особенности существования газов (в основном водорода) в раство-

ренном состоянии и наличие большого числа гидрофобных неметаллических твердых включений микроскопического и субмикроскопического размеров определяют отличие условий распространения мощного ультразвука в расплавах металлов от воды и ее растворов. Именно поэтому кавитационная прочность и изменение средних акустических свойств жидких металлов в поле ультразвука несколько отличаются от хорошо изученных свойств кавитирующей воды. В связи с этим меняется топография кавитационной области и выбор оптимальных схем и режимов ультразвуковой обработки жидких металлов должен учитывать акустические свойства того или иного кавитирующего расплава.

Высокая агрессивность жидкого металла предопределяет также особый подход к выбору материала излучателя и условий работы последнего в кавитирующем расплаве.

Наконец, эффективность ряда технологических процессов ультразвуковой обработки жидкого металла, таких, как, например, рафинирование расплава от неметаллических включений, распыление и др., зависит от степени развития акустической кавитации в расплавленном металле.

Реальные расплавы содержат частицы не смачиваемых неметаллических примесей (оксиды, карбиды, нитриды и др.), которые существенно ослабляют кавитационную прочность жидкого металла. Поэтому, несмотря на сравнительно высокие значения поверхностного натяжения, вязкости, плотности и скорости распространения ультразвука в расплавах металлов, в последних возможно возникновение и развитие акустической кавитации.

Образование и развитие кавитации меняет усредненные акустические свойства расплава, при этом принято говорить о некотором специфическом объеме жидкости, примыкающем к поверхности излучения ультразвука и называемом кавитационной областью. Размеры этой области в значительной степени зависят от интенсивности ультразвуковой обработки и чистоты расплава по зародышам кавитации.

Распространение ультразвука малой (докавитационной) мощности в расплаве заданного технологического объема и при конечных размерах колебательной системы должно учитывать отражение колебаний от стенок емкости и поверхности жидкого металла. Поэтому, как правило, при распространении ультразвука малой интенсивности формируется интерференционная картина с максимумами и минимумами звукового давления, так как на низких ультразвуковых частотах (10–30 кГц) размеры объема расплава оказываются соизмеримыми с длиной волны ультразвука. При

этом можно говорить о режиме распространения стоячих волн.

По мере затрат ультразвуковой энергии на образование и развитие кавитации, а также на формирование акустических потоков интерференционная картина сглаживается и характер ультразвукового поля в технологическом объеме приобретает мелкомасштабный диффузный характер. Это означает, что рассеяние и отражение ультразвуковых колебаний от одной или нескольких кавитационных областей, меняющих свое положение в объеме расплава из-за случайности кавитационных событий и активного перемещения скопления кавитационных полостей акустическими течениями, приводит к усреднению и сглаживанию интерференционных пиков, усреднению поля. При этом режим распространения бегущей волны в объеме жидкого металла обеспечивается за счет потерь ультразвуковой энергии в кавитирующем расплаве. Потери ультразвуковой энергии на кавитацию и потоки можно легко охарактеризовать разогревом объема кавитирующего расплава.

С помощью молекулярно-кинетической теории жидкого состояния для каждой жидкости можно определить критическое давление или критическую температуру, при которой среднее расстояние между молекулами увеличивается настолько, что жидкость разрушается. Соответственно явление разрыва жидкости при приложении отрицательного (растягивающего) давления носит название кавитации, а явление разрыва жидкости при ее перегреве – кипения.

Для рассматриваемого нами случая акустической кавитации условие кавитационной прочности жидкости таково: при максимальном отрицательном давлении P_p жидкость можно раздвинуть на длину удаленного расстояния R между соседними молекулами. Минимальное значение P_p равно отношению поверхностного натяжения σ к $R/2$, т. е. $P_p = 2\sigma / R$.

Расчеты по этому уравнению показывают, что теоретическая кавитационная прочность жидкостей (вода, расплавы металлов) очень велика и составляет 10^9 – 10^{10} Па. В то же время реальные измерения кавитационной прочности воды и некоторых расплавов металлов свидетельствуют о том, что порог кавитации $P_k \ll P_p$ и равен всего 10^5 – 10^6 Па.

Все известные жидкие металлы и их сплавы в той или иной мере содержат в своем составе растворимые и нерастворимые примеси. Если растворимые или хорошо смачиваемые расплавом примеси мало влияют на кавитационную прочность, то плохо смачиваемые нерастворимые примеси служат зародышами кавитации независимо от своих размеров. Однако если не смачиваемая поверхность

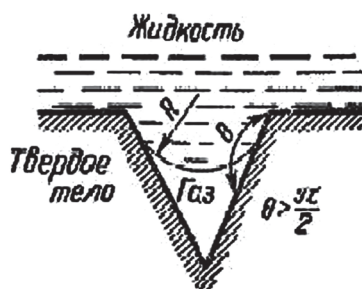


Рис. 1. Модель кавитационного зародыша Френкеля–Гарвея в виде не смачиваемой (гидрофобной) твердой частицы

является плоской, то со временем из-за постепенного растворения адсорбированных на поверхности газов она смочится расплавом и перестанет играть роль зародыша кавитации. Другое дело, когда такая неметаллическая твердая частица имеет на своей поверхности щели и впадины (рис. 1). При плохой смачиваемости трещины расплавом соприкасающаяся с ней жидкость образует относительно газа выпуклый мениск, и если впадина или трещина имеет достаточно острый угол, то газовая фаза становится источником зарождения кавитации при сравнительно небольших значениях P_K .

Адгезия жидкости к твердой поверхности и ее «смачивание» определяются значением $\Delta\sigma$, т. е. разностью поверхностных энергий $\sigma_{1,0}$ и $\sigma_{2,0}$ на границах жидкость – пар (газ) и твердое тело – пар (газ) соответственно и поверхностной энергией $\sigma_{1,2}$ на границе жидкость – твердое тело:

$$\Delta\sigma = \sigma_{1,0} + \sigma_{2,0} - \sigma_{1,2}.$$

Рассматривая трещинку в твердой частице, в устье которой может быть сосредоточена паровая или газовая фаза и обозначая θ контактный угол между этой фазой и жидкостью, имеем

$$\sigma_{1,2} = \sigma_{1,0} + \sigma_{2,0} \cos \theta,$$

или по определению

$$\Delta\sigma = \sigma_{2,0} (1 - \cos \theta).$$

Случай $\Delta\sigma = 0$ означает, что контактный угол обращается в нуль, что соответствует совершенно плоскому пузырьку, т. е. полному не смачиванию твердой поверхности жидкостью.

Согласно теории Я. И. Френкеля, не размеры содержащихся в жидкости взвешенных частиц, а только физико-химические свойства жидкости и в первую очередь значение адгезии или «смачивания» $\Delta\sigma$ определяют способность этих частиц стать зародышами кавитации.

Таким образом, если в жидкости имеются взвешенные частицы со сложным микрорельефом, то в трещинках и щелях таких частиц, плохо смачиваемых жидкостью (расплавом), часто остается газовая фаза и поэтому зарождение кавитационной по-

лости под действием растягивающих давлений звуковой волны должно всегда начинаться с газовой фазы в устье такой трещины.

Знакомство с основными физико-химическими свойствами жидких металлов показывает, что и плотность, и поверхностное натяжение металлических жидкостей выше, чем у воды и ее растворов, именно с этим, очевидно, и связан тот факт, что кавитационная прочность жидких металлов примерно на порядок выше кавитационной прочности воды.

Некоторые экспериментальные оценки ряда жидких металлов (олово, цинк, индий, свинец, алюминий) свидетельствуют, что на частоте 18 кГц порог кавитации равен $(5-10) \cdot 10^5$ Па.

Теоретическая оценка по уравнению Блейка показывает, что для резонансного размера кавитационной полости $10^{-7} \text{ м} \leq R_0 \leq 10^{-5} \text{ м}$ экспериментальные оценки неплохо согласуются с теорией. На рис. 2 показана зависимость кавитационной прочности жидких металлов от радиуса газового зародыша кавитационной полости.

Необходимо отметить, что эти оценки не учитывают чистоты расплава по неметаллическим включениям и можно рассматривать только как некоторые предельные значения.

Наиболее полно изучено влияние чистоты по твердым не смачиваемым примесям на кавитационную прочность в сложной системе жидкий алюминий – оксид алюминия – водород. Расплавленный алюминий взаимодействует практически только с водородом и кислородом, причем последний присутствует в форме оксида алюминия Al_2O_3 – прочного химического соединения, обладающего низкой степенью термической диссоциации. Оксид алюминия находится в расплаве обычно в виде тонкодисперсной взвеси размером менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Водород находится в расплавленном алюминии преимущественно в растворенном состоянии и толь-

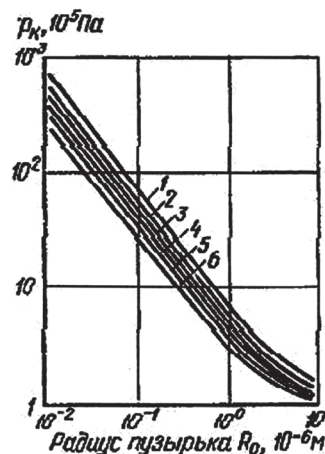


Рис. 2. Теоретическая кавитационная прочность жидких металлов в зависимости от начального радиуса зародыша кавитационной полости: 1 – Zn; 2 – Cd; 3 – Sn; 4 – Pb; 5 – Bi; 6 – In

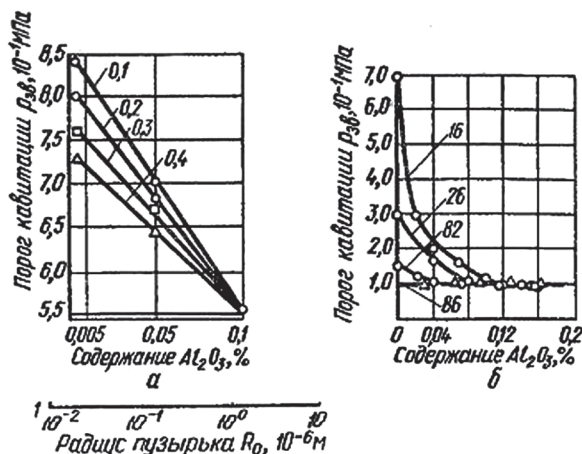


Рис. 3. Кавитационная прочность расплава алюминия А-7 (а) и дистиллированной воды (б) в зависимости от чистоты по твердым включениям и газам: а – кавитационная прочность расплава алюминия; б – кавитационная прочность дистиллированной воды

ко небольшая его часть адсорбирована на твердых частицах оксида алюминия. Сложный состав реального оксида алюминия способствует хемосорбции водорода из раствора в свободное состояние. Зависимости кавитационной прочности расплава алюминия от его чистоты по примесям водорода и оксида алюминия (рис. 3) свидетельствуют о том, что кавитационная прочность жидкого металла на порядок выше, чем для воды.

Из приведенных выше данных следует, что наиболее эффективно явление кавитации в жидких средах развивается в присутствии нерастворимых примесей и кавитационная прочность расплавов металлов на порядок выше прочности воды.

Непосредственным результатом воздействия ультразвуковых колебаний на кристаллизующийся металл являются структурные изменения, происходящие в слитке. Результаты воздействия ультразвука можно охарактеризовать следующими изменениями структуры [4]:

- уменьшением средней величины зерна;
- устранением столбчатой структуры и образованием равноосного зерна;
- изменением характера распределения фаз (по количеству, степени измельчения и взаимному расположению);
- повышением однородности слитка, уменьшением степени развития ликвационных процессов;
- более равномерным распределением неметаллических включений по объему слитка.

Перечисленные эффекты не исчерпывают всех структурных изменений, которые в действительности может вызвать кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. В ряде случаев столбчатая структура не устраняется, но толщина столбчатых кристаллов уменьшается, а иногда при переходе

через некоторые пороговые значения мощности ультразвука наблюдается укрупнение кристаллов определенной фазы.

На рис. 4 показано изменение микроструктуры стали Х27 под влиянием ультразвуковой обработки. Ультразвуковая обработка приводит к измельчению зерна.

Часто в результате обработки устраняется дендритный характер микроструктуры. На рис. 5 приведена микроструктура хромоникелевой стали Х25Н20 необработанной, а также обработанной ультразвуком.

В многофазных сплавах изменяется характер распределения фаз; это не может быть следствием уменьшения величины зерна, а говорит о влиянии иных факторов, связанных с особенностями кристаллизации в ультразвуковом поле. На рис. 6 показаны фотографии микрошлифов высокопрочного сплава на никелевой основе ЭИ-661.

При обработке упругими колебаниями на границах зерен выделяется хрупкая фаза. В слитках, закристаллизовавшихся без воздействия колебаний, эта фаза выделяется в значительно меньшем количестве.

Образование мелкой равноосной структуры способствует повышению однородности слитка и препятствует развитию зональной и дендритной ликвации. На рис. 7 показана микроструктура латуни (40% Zn). При кристаллизации контрольного слитка

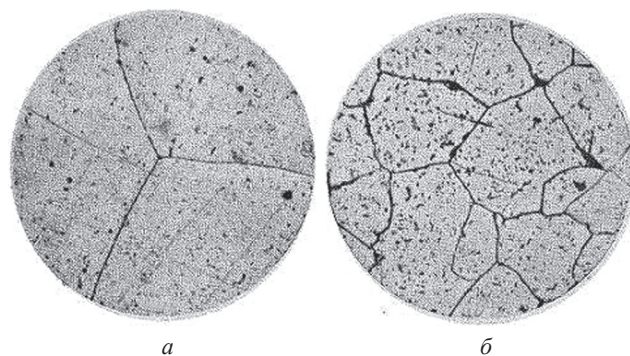


Рис. 4. Микроструктура стали Х27: а – необработанной; б – обработанной ультразвуком. $\times 100$

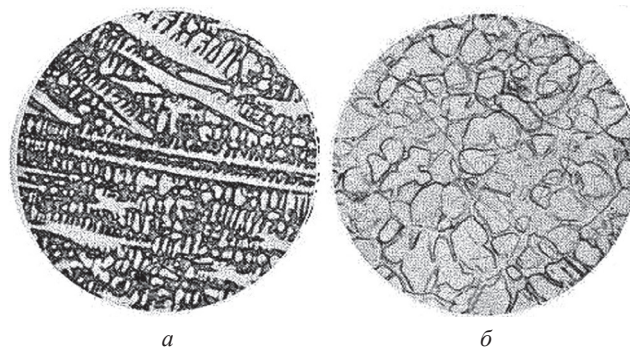


Рис. 5. Микроструктура стали Х25Н20: а – необработанной; б – обработанной ультразвуком: $\times 100$

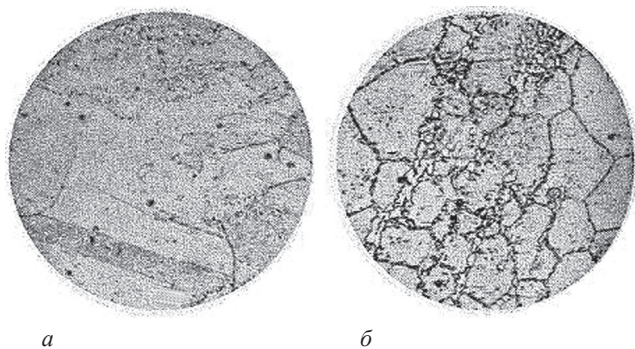


Рис. 6. Микроструктура сплава на никелевой основе ЭИ-661: *а* – необработанной; *б* – обработанной ультразвуком. $\times 600$

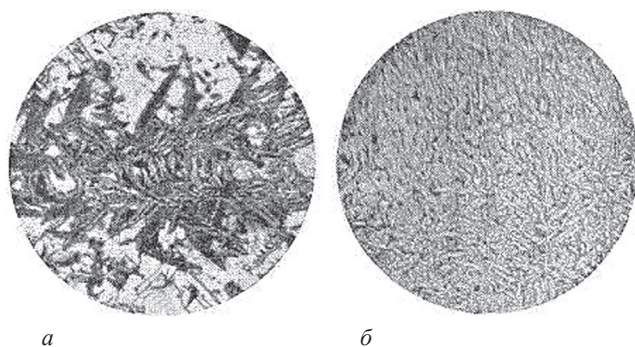


Рис. 7. Микроструктура латуни: *а* – необработанной; *б* – обработанной ультразвуком. $\times 100$

ка получены крупные мартенситные иглы на фоне основного твердого раствора. Распределение мартенситной фазы – неравномерное. Кристаллизация в ультразвуковом поле позволила получить тонкую мартенситную структуру, равномерно распределенную по всему полю.

В сталях ШХ15, Х27, Х25Н20 и других наблюдается более равномерное распределение неметаллических включений под действием ультразвука.

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о разнообразных и существенных изменениях в макро- и микроструктуре слитков под действием ультразвука.

Причин, по которым сдерживается широкое применение ультразвука в металлургических процессах, несколько. В первую очередь это связано с тем, что кавитационная прочность жидких металлов на порядок выше, чем для жидкостей, используемых в процессах химической и перерабатывающей промышленности, где широко используется ультразвук. Повышенная кавитационная прочность жидких металлов требует соответствующего

увеличения мощности источников ультразвука. Необходимая удельная мощность, подводимая к магнитострикционному преобразователю, в экспериментальных установках находится на уровне 1,5–2,0 кВт на 1 кг обрабатываемого металла для сталей с содержанием углерода более 0,4% (с меньшим содержанием углерода необходима мощность выше 3,5 кВт) [5]. Не сложные расчеты показывают, что не самый большой слиток массой 100 кг требует мощности ультразвукового генератора в пределах 150–200 кВт. Для примера при электрошлаковом переплаве стали Х12МФ в водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 210 мм (масса слитка 120 кг) потребляемая источником питания мощность не превышает 140 кВт.

Еще одна причина вызвана тем, что для достижения положительных результатов при ультразвуковой обработке необходимо обеспечить развитие интенсивной кавитации в обрабатываемом объеме жидкого металла. Для успешного развития кавитации требуются соответствующие условия: наличие растворенных в металле газов и неметаллических включений с развитой поверхностью. В большинстве случаев неметаллические включения и растворенные газы считаются вредными примесями и от них стремятся любыми способами очистить жидкий металл. Но по мере очистки жидкого металла ухудшаются условия развития кавитационного процесса и падает эффективность воздействия ультразвука. В таких металлургических процессах как электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, где наблюдается хорошая очистка металла по неметаллическим включениям, требуемые значения мощности для генерации ультразвука должны быть еще больше, чем приведенные выше.

В данной ситуации, на наш взгляд, перспективно применение импульсных источников акустического воздействия. Принцип работы большинства импульсных устройств основан на медленной зарядке накопителя энергией с последующим быстрым высвобождением накопленной энергии в заданном рабочем объеме. При этом мгновенная мощность в импульсе на несколько порядков может превышать мощность соответствующей установки непрерывного действия, что позволит обрабатывать большие объемы металла при соизмеримых затратах энергии.

Литература

1. Промтов М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества: Учеб. пособ. М.: Машиностроение-1, 2004.
2. Кардашев Г. А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990.
3. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособ. для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский и др. М.: Высш. шк., 1987.
4. Физические основы ультразвуковой технологии / Под. ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968.
5. Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М.: Металлургия, 1972.