

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ГАЗОВУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ АЛЮМИНИЕВОМ РАСПЛАВЕ

А. В. Синчук, канд. техн. наук;

А. В. Иванов, мл. науч. сотр.;

В. Н. Цуркин, доц., канд. физ.-мат. наук;

Р. А. Тарасенко, магистр

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Аннотация. Апробированы методы, реализующие электродинамическое воздействие на кристаллизующийся расплав. Путем пропускания частотно-повторяющихся килоамперных импульсов тока и обработки поверхности расплава коронным разрядом отрицательной полярности в алюминиевом сплаве АК7 получен объем равномерно распределенной пористости, компенсирующий его физическую усадку. Обсуждены вероятные механизмы, поясняющие влияние электродинамических факторов на насыщение расплава водородом из окружающей атмосферы и фиксацию газовых пузырьков во время затвердевания.

Ключевые слова: расплав, водород, усадка, «полезная» пористость, импульсный ток, коронный разряд.

Анотація. Апробовано методи, що реалізують електродинамічний вплив на розплав, що кристалізується. Шляхом пропускання частотно-повторюваних кілоамперних імпульсів струму й обробки поверхні розплаву коронним розрядом негативної полярності в алюмінієвому сплаві АК7 отримано об'єм рівномірно розподіленої пористості, що компенсує його фізичну усадку. Обговорено ймовірні механізми, що пояснюють вплив електродинамічних факторів на насичення розплаву воднем з навколишньої атмосфери й фіксацію газових бульбашок під час твердіння.

Ключові слова: розплав, водень, усадка, «корисна» пористість, імпульсний струм, коронний розряд.

Abstract. The methods realizing electrodynamic influence on crystallizing melt are approved. By kiloampere frequency-repeating current pulses and melt surface processing with negative polarity corona discharge in aluminium alloy AK7. The received volume is of regular distributed porosity, which compensates its physical shrinkage. The probable mechanisms explaining influence of electrodynamic factors on melt saturation by hydrogen from the surrounding atmosphere and fixing gas bubbles during hardening are discussed.

Keywords: melt, hydrogen, shrinkage, «useful» porosity, pulse current, corona discharge.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В практике литейного производства применялось и до сих пор применяется множество мер для борьбы с водородной пористостью начиная от плавки в защитной атмосфере и заканчивая различными методами дегазации расплава. В отличие от других газов, которые, взаимодействуя с металлом во время плавки, образуют твердые неметаллические включения, водород в чистом алюминии и его сплавах растворяется [4, 5, 9]. Естественно, что в результате понижения температуры растворимость водорода в расплаве снижается и газ выделяется из раствора в самостоятельную пузырьковую фазу. В итоге после кристаллизации в твердом металле обнаруживаются газовые поры диаметром 0,1...2,0 мм и более, наличие которых всегда считалось вредным явлением, ухудшающим физико-механические свойства металла. Однако в последнее время все чаще появляется информация о полезной роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов [2, 3]. Речь идет о рафинирующей способности водорода удалять из расплава неметаллические включения, о том, что в сплавах с рассредоточенными мелкими порами часто снижается уровень внутренних напряжений и склонность к образованию трещин, о том, что водород является элементом, необходимым для получения пеноалюминия.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Результаты исследований чл.-кор. НАН Украины Г.П. Борисова выявляют возможность компенсации усадочного процесса «полезной» водородной пористостью [1, 7]. Действительно, чтобы изготовить плотную непористую отливку традиционным литьем, нужно в два,

а то и в три раза больше металла потратить на питающую прибыль, в то время, как для компенсации объемной усадки алюминиевых сплавов требуется не более 6%. Источником такой компенсации как раз и может быть равномерно распределенная в теле отливки газовая пористость, для образования которой нужно не дегазировать, а наоборот — насыщать расплав водородом. Но если процесс насыщения реализовать относительно просто, то удержать водород в расплаве при снижении температуры, подавить всплытие пузырьков газа на поверхность и зафиксировать газовую фазу внутри стынувшей отливки в виде «полезной пористости» — задача, которая требует на сегодняшний день технологических решений.

Среди фактов применения электродинамических воздействий на расплавы с этой целью известен разработанный в США метод, который включает в себя перемешивание предварительно насыщенного водородом расплава посредством пропускания тока с одновременным действием поперечного магнитного поля [10]. Очевидно, что для изготовления фасонных отливок этот метод непригоден. Известны также попытки применения электрической дуги, которая зажигается в атмосфере водорода над поверхностью расплава и способствует образованию равномерно пористого металла [6]. Тем не менее, большинство аспектов, связанных с насыщением газами, и, самое важное, гарантированным сохранением газовой составляющей при кристаллизации, что обеспечивает формирование пористого материала с определенным уровнем дисперсности и распределения газовых пор, еще недостаточно изучены, чтобы предложить эти методы к промышленному освоению.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — определить технические и технологические возможности

получения сплавов с «полезной пористостью», компенсирующей физическую усадку сплавов, такими методами электродинамического воздействия на кристаллизующийся расплав, как пропускание импульсов разрядного тока и обработка поверхности коронным разрядом.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Методика экспериментальных исследований. В качестве объекта исследований выбран доэвтектический сплав АК7, который имеет широкий температурный интервал кристаллизации (около 40 °С) и склонен к образованию усадочной пористости. Удобство также состояло в том, что этот сплав относится к двойной системе Al–Si, а, значит, имеет простую и хорошо интерпретируемую кривую охлаждения. Химический состав чушкового сплава: 6,38% Si; 0,40% Mg; 0,12% Mn; 0,54% Fe; 0,60% Cu.

Расплавление осуществлялось в электропечи при 700 °С. Затем расплав из тигля последовательно переливался в предварительно подогретые до 300 °С керамические стаканы (диаметром 50 мм, высотой 100 мм), в которых он подвергался электродинамическому воздействию. Для дополнительной теплоизоляции стаканы помещались в кожух из шамотного кирпича. Предвари-

тельно в одном из стаканов с расплавом регистрировалась кривая охлаждения, исходя из которой определялся интервал кристаллизации и температурно-временной интервал обработки. Измерение температуры расплава и регистрация кривых охлаждения осуществлены при помощи малоинерционных термопар хромель-алюмель (верхний рабочий предел термопары 1300 °С) и высокочастотного измерительного комплекса с фиксацией данных на персональный компьютер.

Схема обработки импульсным током показана на рис. 1. В качестве источника питания использовался высоковольтный генератор импульсных токов. Токоподвод к расплаву осуществлялся с помощью электродной системы типа «острие–острие». Медный электрод-стержень диаметром 5 мм («+» электрод) погружался в расплав на глубину до 5 мм. Металлический противозлектрод, вмонтированный в днище стакана, контактировал с медной пластиной, которая подсоединялась к разрядному контуру. Данные об электрических характеристиках разрядного импульса поступали на запоминающий осциллограф с омического делителя и коаксиального шунта тока. В ходе эксперимента варьировали начальное напряжение на конденсаторе U_0 , определяющее значение силы тока I_{max} , и частоту посылки

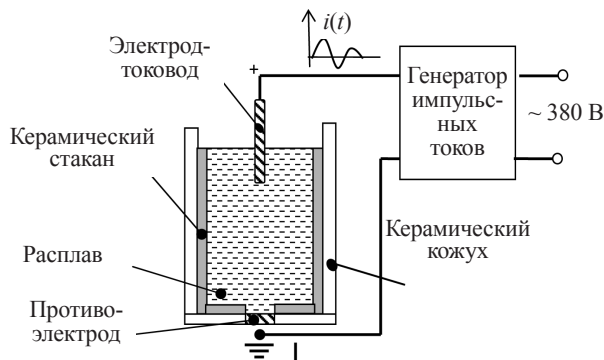


Рис. 1. Схема обработки импульсным током

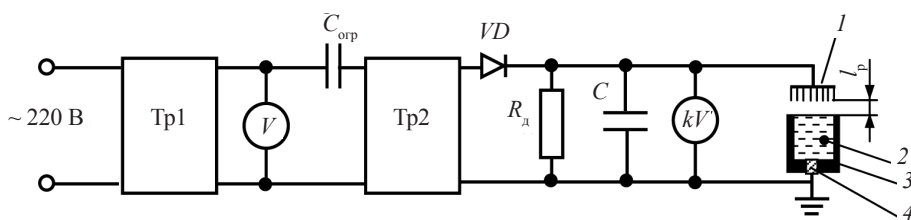


Рис. 2. Схема обработки коронным разрядом: Tr1 — автотрансформатор; Tr2 — высоковольтный трансформатор; V — мультиметр; $C_{\text{орп}}$ — токоограничивающая емкость; VD — высоковольтная диодная сборка; $R_{\text{д}}$ — демпфирующее сопротивление; C — конденсатор; kV — киловольтметр; h — межэлектродный промежуток; 1 — коронирующий электрод; 2 — расплав; 3 — керамический стакан; 4 — противозлектрод

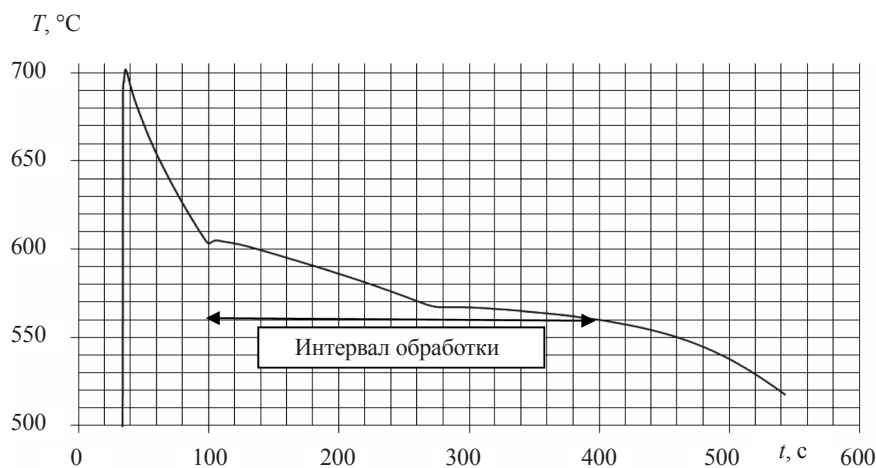


Рис. 3. Кривая охлаждения сплава АК7

импульсов f . Индуктивность разрядного контура составляла 2,5 мкГн, емкость конденсаторной батареи — 0,5 мкФ.

Для обработки поверхности расплава коронным разрядом использовались электрод, выполненный в форме щетки, который размещался над поверхностью на расстоянии 10 мм, и высоковольтный источник постоянного напряжения (рис. 2).

Проводили обработку расплава коронным разрядом, зажженным в сухой воздушной атмосфере, и разрядом, зажженным во влажной атмосфере. Для этого в процессе обработки в межэлектродный промежуток вводился водяной пар. Полярность короны определялась полярностью верхнего коронирующе-

го электрода. Рабочее напряжение U_0 выбиралось из условия устойчивого горения короны и отсутствия пробоя межэлектродного промежутка и в зависимости от влажности атмосферы поддерживалось в пределах 16,0...16,7 кВ.

Длительность пропускания импульсов тока, как и длительность обработки коронным разрядом, не превышала временной интервал затвердевания расплава, т. е. промежутка, когда происходит выделение газов и образование пор, и в соответствии с кривой охлаждения составляла 5 минут (рис. 3). Пористость образцов исследовалась на оптическом микроскопе «Неофот–32М» по стандартным методикам статистической металлографии.

Результаты эксперимента. Результаты обработки расплава импульсным током представлены в табл. 1 и на рис. 4. Напомним, что экспериментальные условия включали медленную кристаллизацию расплава со скоростью не более 1...2 °С/с начиная от температуры выплавки, когда вязкость расплава достаточно мала, что позволяло растворенному газу выделяться в пузырьки и свободно всплывать на поверхность. В таких условиях затвердевал необработанный сплав с образованием четко выраженной усадочной раковины и рыхлости в верхней части, которая формировалась всплывающими пузырьками (образец 1). В то же время, как можно видеть, при кристаллизации в условиях протекания импульсов тока формирование усадочной раковины подавляется, а образцы характеризуются значительным содержанием пор, видимых невооруженным глазом. Поры расположены практически равномерно

по объему образца и ориентированы острыми краями в различных направлениях, а их количество увеличивается с увеличением силы тока и частоты следования импульсов, т. е. с ростом мощности электродинамического воздействия. При этом очевидно, что частота прохождения импульсов имеет ключевое влияние в формировании пористого металла, а необходимый объем пористости более 6 % обеспечивается частотой, близкой к пределу возможностей для высоковольтного оборудования данного типа. Влияние скин-слоя, по которому протекает импульс тока, не прослеживается (толщина скин-слоя составляла порядка 1 мм), поскольку в диаметральной плоскости поры тоже равномерно распределены, отсутствуют видимые скопления по периферии или, наоборот, по оси образца.

Результаты обработки расплава коронным разрядом представлены в табл. 2 и на рис. 5. При воздействии положительной

Таблица 1. Результаты обработки расплава импульсным током

Номер образца	I_{max} , кА	U_0 , кВ	f , Гц	Диаметр пор, мм	Объем пор, %
1	контрольный			1,4	2
2	4	12	0,5	0,3	7
3			12	1,0	10
4	6	20		1,5	15

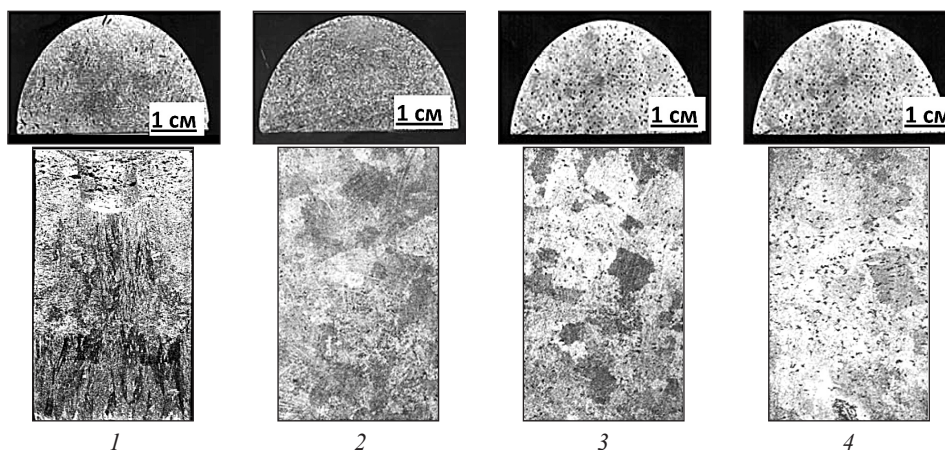


Рис. 4. Образцы, полученные после обработки расплава импульсным током

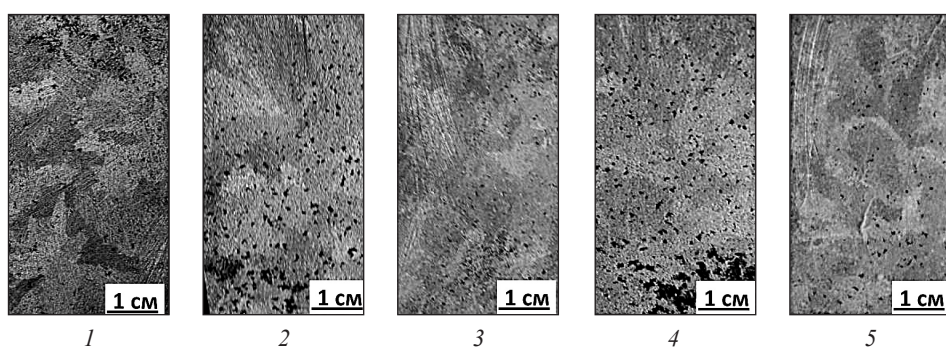


Рис. 5. Образцы, полученные после обработки расплава коронным разрядом

Таблица 2. Результаты обработки расплава коронным разрядом

Номер образца	Окружающая атмосфера	Полярность короны	Диаметр пор, мм	Объем пор, %
1	контрольный		0,7	2
2	сухая	положительная	1,0	13
3		отрицательная	0,5	7
4	влажная	положительная	1,3	19
5		отрицательная	0,8	10

короны на расплав получены образцы с пористостью, более достаточной для подавления усадки сплава, но распределение пор при этом крайне неравномерное. Их количество меньше в верхней части и больше в нижней части образцов. При этом в нижней части наблюдается образование целых конгломератов, подобных подсушенной рыхлости, т. е. реализуется картина, противоположная естественному кристаллизационному процессу. В целом характер полученной пористости в образцах таков, как будто происходило направленное вниз перемещение растворенного в расплаве газа и скапливание в донной части образца. В образцах, закристаллизованных под воздействием отрицательной короны, пористость равномерная и для влажной атмосферы ее объем больше. С точки зрения формирования «полезной» пористости, очевидно, такая схема обработки является предпочтительной.

Обсуждение результатов. Итак, результаты эксперимента показывают, что вследствие наложения электроди-

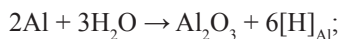
намического воздействия на расплав во время затвердевания всплывают газовые пузырьки на поверхность подавляются, а формирование равномерной «полезной» пористости компенсирует неизбежное при фазовом превращении уменьшение объема сплава.

Вначале попытаемся ответить на вопрос, каким образом сформируется эта пористость, если в воздухе концентрация водорода по объему составляет $5 \cdot 10^{-5} \%$ или $3 \cdot 10^{-6} \%$ по массе. Более того, результаты проведенного в рамках газокинетической теории расчета показывают, что количество водорода, затраченное на образование пор в обработанном сплаве, значительно превосходит равновесную растворимость водорода S при нормальном давлении в газовой фазе и температуре выплавки. Например, из табл. 3 следует, что при температуре выплавки $700 \text{ }^\circ\text{C}$ на образование всех пор, компенсирующих 6%-е изменение объема в сплаве, требуется количество атомов водорода $N_{\text{ат}}^{\text{пор}} \approx 18 \cdot 10^{19}$. Это в 4 раза больше, чем

количество атомов $N_{\text{ар}}$, которое в соответствии с равновесной диаграммой состояния Al–H₂ может раствориться при данной температуре в расплаве. Исходя из предельной растворимости водорода в расплаве, формирование необходимого 6%-го объема пор становится возможным только начиная с 900 °С и выше, когда $N_{\text{ар}} \geq N_{\text{ар}}^{\text{пор}}$.

Экспериментально же в сплавах в условиях электродинамического воздействия получен объем пористости, значительно превышающий необходимые 6 % (до 20 %), при этом отмечается увеличение пористости образцов с ростом влажности атмосферы. Таким образом, результаты эксперимента позволяют предположить следующее:

расплавление и кристаллизация алюминиевого расплава сопровождается взаимодействием не с молекулярным водородом, а с содержащимся в атмосфере водяным паром в соответствии с известной реакцией



тепловые, силовые и электромагнитные поля либо оказывают на протекание этой реакции каталитическое действие, либо способствуют предварительной полной диссоциации молекул воды с образованием и диффузионным проникновением в расплав атомов водорода.

Рассмотрим некоторые механизмы, в соответствии с которыми может происходить насыщение жидкого сплава водородом и его фиксация в виде самостоятельной газовой фазы в закристаллизованном сплаве.

Действие коронного разряда. Наиболее вероятный механизм ионизации водорода, находящегося над поверхностью расплава при подаче напряжения на электроды, — ионизация электронным ударом. Для этого нужно, чтобы ионизирующая частица (электрон) приобрела в электрическом поле кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} > A \left(1 + \frac{m}{M}\right),$$

где m — масса электрона; M — масса атома водорода; v — скорость электрона; $A \approx 0,48 \cdot 10^{-19}$ — работа ионизации, Дж.

В случае приложения электрического поля напряженностью E , В/м, электрон с зарядом e на расстоянии свободного пробега λ приобретает кинетическую энергию порядка $E \cdot e \cdot \lambda$. Величину λ можно оценить как длину свободного пробега частицы идеального газа по известному соотношению из газокинетической теории:

$$1 = \lambda \cdot n \cdot \sigma,$$

где n — плотность частиц, которую можно принять равной числу Лошмидта $A_L = 2,7 \cdot 10^{25}$; σ — сечение рассеяния.

Если принять

$$\sigma \approx \pi d^2,$$

где d — диаметр атома водорода, то длина свободного пробега электрона будет около $0,4 \cdot 10^{-5}$ м.

В этом случае расчетная напряженность поля, необходимая для ударной ионизации атома водорода, составляет приблизительно $1 \cdot 10^5$ В/м. Экспериментально реализованное значение напряженности в межэлектродном промежутке $(16,0 - 16,7) \cdot 10^5$ В/м.

Таблица 3. Данные для оценки взаимосвязи количества растворенного водорода и пористости в сплаве АК7

Показатель	T, °C			
	700	800	900	1000
S, см ³ /100 г	0,6	1,25	2,25	3,6
$N_{\text{ар}} \cdot 10^{19}$	4,5	8,5	14,0	20,5
$N_{\text{ар}}^{\text{пор}} \cdot 10^{19}$	18,0	15,0	13,6	12,5

Анализируя причины различной газонасыщенности сплавов, закристаллизованных под действием положительной и отрицательной короны, следует отметить, что во внешней области коронного разряда (область, примыкающая к поверхности расплава) носителями тока являются ионы того же знака, что и коронирующий электрод. При горении положительной короны — ионы H^+ , которые движутся к отрицательному электроду-расплаву и восстанавливаются на его поверхности до атомарного состояния. Так возникает возможность дополнительного насыщения расплава водородом сверх количества, определяемого химической реакцией восстановления водорода из воды. Если же расположенный над расплавом коронирующий электрод имеет отрицательную полярность, то воспроизводство положительных ионов H^+ происходит во внутренней, следовательно, более отдаленной от поверхности расплава области короны. Безусловно, механизмы электростатического воздействия, определяющие дальнейшее проникновение водорода вглубь расплава, его распределение внутри и скапливание в донной части жидкого проводника в случае положительной короны пока что остаются неясными.

Действие импульсного тока. Без определения точного количества газа в образцах сложно ответить на вопрос, происходит ли, и если да, то посредством какого механизма, дополнительное насыщение расплава водородом при пропускании через него импульсного тока. На данный момент нет единого мнения по этому поводу даже в отношении постоянного тока. Например, в работе [8] показано, что при малом времени обработки расплавов постоянным током наблюдается дегазирующий эффект, при более длительном времени и больших плотностях тока — эффект

газонасыщения. Однако механизмы электродинамического влияния на перемещение пузырьковой фазы в расплаве, которые обеспечивают ее фиксацию и равномерное распределение внутри твердого объема, могут быть рассмотрены в рамках положений магнитной гидродинамики.

В частности известно, что движение в жидком проводнике, по которому проходит электрический ток, возникает либо под действием объемной электромагнитной силы, либо как результат тепловой конвекции из-за джоулева тепловыделения. Несложно подсчитать, что за время, равное 5 минутам пропускания через расплав импульсов тока, характеристики которых представлены в табл. 1, периферийный скин-слой, в котором выделяется джоулево тепло, нагреется по сравнению с основной массой расплава не более, чем на несколько градусов. Возникающий за счет этого градиент температур слишком мал, чтобы инициировать ощутимые конвективные потоки в объеме.

Если электрический ток не имеет радиальной составляющей, а распространяется с однородной плотностью по расплаву, то электромагнитная сила тоже не будет приводить металлическую жидкость в движение. Но если в расплаве имеются тела (неметаллические включения, газовые пузырьки), электропроводимость σ_2 которых отличается от электропроводимости расплава σ_1 , то возникает отклонение линий электрического тока от прямолинейного параллельного пути и появляются причины для возникновения движения расплава (рис. 6). В данном случае электропроводимость пузырька с водородом составляет $2 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$, электропроводимость расплава при температуре $700 \text{ }^\circ\text{C}$ — порядка $4 \cdot 10^6 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.

Кроме того, если по расплаву проходит импульс высокочастотного тока, то

каждой из контактирующих сред с различной электропроводимостью будет соответствовать свой скин-слой с толщиной, определяемой значением электропроводимости. У поверхности контакта оба слоя будут плавно смыкаться, а вблизи скачка электропроводимости возникать неоднородность в распределении плотности электрического тока, т. е. возбуждаться движение расплава. В конечном счете такое «обтекание» расплавом газового пузырька фиксирует его на месте, препятствуя направленному перемещению вверх под действием силы Стокса.

ВЫВОДЫ

Компенсация физической объемной усадки алюминиевого сплава «полезной» пористостью может обеспечиваться исследованными методами электротокowego и электроразрядного воздействия на затвердевающий расплав при соблюдении оптимальных технологических условий обработки: начальной температуры расплава, определяющей растворимость водорода в расплаве;

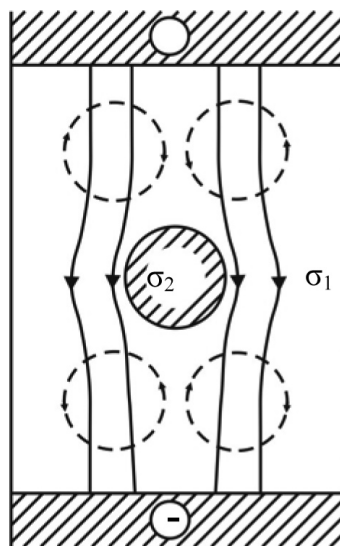


Рис. 6. Характер движения расплава вокруг газового включения

влажности окружающей атмосферы и параметров электродинамического воздействия, определяющих насыщение расплава водородом и фиксацию газовой фазы во время охлаждения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Борисов, Г. П.** О взаимосвязи эффективности водородной обработки с технологическими параметрами процесса формирования отливок из алюминиевых сплавов [Текст] / Г. П. Борисов, Ф. М. Котлярский, В. И. Белик // Водородная обработка материалов : тр. III Междунар. конф. «ВОМ-2001», Донецк-Мариуполь, 14-18 мая 2001 г. — Донецк : ДонГТУ, 2001. — Ч. 1. — С. 238-242.
- [2] **Борисов, Г. П.** О положительной роли газовой пористости в упрочнении процессами формирования алюминиевых отливок [Текст] / Г. П. Борисов // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 3. — С. 41-47.
- [3] **Борисов, Г. П.** О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов [Текст] / Г. П. Борисов // Металлургия машиностроения. — 2005. — № 5. — С. 11-20.
- [4] Газы в цветных металлах и сплавах [Текст] / Д. Ф. Чернега, О. М. Бялик, Д. Ф. Иванчук, Г. А. Ремизов. — М. : Металлургия, 1982. — 176 с.
- [5] Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах [Текст] / В. И. Добаткин, Р. М. Габидуллин, Б. А. Колачев, Г. С. Макаров. — М. : Металлургия, 1976. — 264 с.

- [6] **Карпов, В. Ю.** Создание газоэвтектического материала — газара с помощью электрической дуги [Текст] / В. Ю. Карпов, В. В. Карпов // Теория и практика металлургии. — 2006. — № 4–5. — С. 67–69.
- [7] **Котлярский, Ф. М.** О возможности получения герметичных бесприбыльных отливок из алюминиевых сплавов [Текст] / Ф. М. Котлярский // Литейное производство. — 1998. — № 7. — С. 17–19.
- [8] О механизме дегазации алюминиевых расплавов электрическим током [Текст] / Ю. Н. Таран, А. Г. Пригунова, И. Л. Бельков, С. С. Петров // Металлы. — 1987. — № 6. — С. 39–44.
- [9] **Чернега, Д. Ф.** Водород в литейных алюминиевых сплавах [Текст] / Д. Ф. Чернега, О. М. Бялик. — Киев : Техника, 1972. — 148 с.
- [10] **Garret, P. R.** The mode of action of antifoams [Text] / P. R. Garret // Defoaming: Theory and Industrial Application / Ed. by P. R. Garret. — New York : Marcel Dekker Inc., 1993. — 1119 p.