

Характерные закономерности перехода жидкого расплавленного металла в твёрдое состояние на фронте кристаллизации в рамках феноменологической модели.

77-30569/282085

12, декабрь 2011

Морозов В. П.

УДК 621.791.052:669.017.3

МГТУ им. Н.Э. Баумана

VMorozov.52@mail.ru

Введение. Процесс плавления металла при сварке с последующей его кристаллизацией характеризуется рядом особенностей. Переход жидкого расплава в твёрдое состояние, происходящий на межфазной границе в так называемой зародышевой зоне, имеет ряд физико-химических закономерностей. Существующая связь между процессами на атомарном, микроскопическом и макро-уровнях, проявляется через резкое возрастание $3,5 \cdot 10^4$ раз коэффициента самодиффузии жидкого металла по сравнению с твёрдым состоянием. При этом на межфазной границе происходит повышение в 10^3 раз теплоёмкости, снижается в 3...4 раза энергия активации молекул, необходимая для изменения их ориентации и возрастает число вакансий в 10^9 раз.

Характер теплового движения атомов.

Частицы в жидкости совершают тепловые колебания с некоторой частотой ($1/\tau_0$), около временных положений равновесия, в то время как в кристаллах, колебания атомов происходят около постоянных узлов кристаллической решётки.

Кроме этих колебаний частицы время от времени резко смещаются, совершая скачкообразные перемещения из одного положения равновесия в соседнее. При этом происходит преодоление высоты потенциального барьера за счёт так называемого трансляционного движения, когда происходит чёткая синхронизация движения одновременно нескольких атомов. Второй вид колебаний представляет характерную черту жидкого состояния вещества и может совершаться с отличной от первого вида частотой и соответствовать самодиффузии частиц жидкости [1].

Из теории кристаллизации хорошо известно, что элементарный процесс плавления или затвердевания происходит тогда, когда атом поверхности удовлетворяет одновременно трём требованиям [2]:

- 1) он должен обладать энергией, достаточной, чтобы перейти в активированное состояние;
- 2) иметь сообразно большую составляющую скорости по нормали к поверхности раздела;
- 3) найти в другой фазе позицию, в которой сможет закрепиться.

Согласно общей теории кристаллизации масса расплава переходит в кристаллическое состояние не мгновенно и не одновременно во всём объёме, но при охлаждении жидкости до температуры кристаллизации или переохлаждения ($-\Delta T, ^\circ\text{C}$) до более низких температур. Рост твёрдой фазы происходит либо в объёме из центров кристаллизации (ЦК), или начинается последовательно с полуплавленных зёрен межфазной границы.

Ранее было установлено [3], что наличие колебательного механизма процесса кристаллизации для чистых металлов и сплавов оказывает прямое влияние на периодичность повторения структурных элементов. В зависимости от вида и системы легирования металла, толщины заготовок, предварительного подогрева, скорости сварки и, соответственно, погонной энергии собственная частота изменяется по величине.

Действие внутреннего колебательного механизма можно регулировать внешним периодическим воздействием от независимого источника энергии в зависимости от места его приложения по отношению к фронту кристаллизации. Местоположение внешнего источника может влиять на ускорение или замедление процесса затвердевания металла, которые существенным образом изменяют форму структурных составляющих. Так для эвтектических алюминиевых сплавов мелкое зерно образуется в фазе ускорения процесса кристаллизации, в случае сварки перитектических сплавов на той же основе измельчение происходит в фазе коротковременного замедления в продвижении межфазной границы [4], перед которой формируется зародышевая зона.

До настоящего времени в научной литературе процессы затвердевания расплава сварочной ванны, движения фронта кристаллизации, роста зерен и кристаллитов металла описывались в макро- и микромасштабе, но отсутствует информация, связанная с изучением особенностей взаимодействия конгломератов молекул и мельчайших частиц на атомарном уровне.

Характерные закономерности формирования зародышевой зоны сварочной ванны в рамках феноменологической модели.

Физическую сущность механизма кристаллизации на межатомарном уровне, необходимо рассмотреть в условиях взаимодействия твёрдой и жидкой фаз, учитывая особенности кинетики и термодинамики протекания необратимых процессов в металле, а также существования различий в свойствах жидкой и твёрдой фаз в области температур плавления.

Объективная сложность непосредственного наблюдения динамики перемещения мельчайших частиц расплава в виде атомов привела к необходимости воспользоваться техническими средствами, которые косвенно позволяют анализировать динамику изменений в жидкой и твёрдой фазах с помощью дифракции рентгеновских лучей или потоков нейтронов.

Переход металла из жидкой фазы в твёрдое состояние сопровождается рядом квантовых процессов, которые можно представить в виде феноменологической модели, включающей три стадии.

Первая стадия связана с температурой жидкости, которая превышает температуру плавления материала. В этом состоянии частицы совершают хаотическое беспорядочное движение, свойственное состоянию атомов и молекул жидкого металла.

Тепловое движение частиц в жидкости носит характер колебаний с одной частотой ($1/\tau_0$) около временных положений равновесия. В некоторые моменты времени частицы резко смещаются, совершая скачкообразные трансляционные перемещения из одного положения равновесия в другое, преодолевая высоту потенциального барьера в момент чёткой синхронизации движения одновременно нескольких атомов. Трансляционные перескоки осуществляются с другой частотой ($1/\tau_1$) и соответствуют процессу самодиффузии частиц жидкости относительно своего ближайшего окружения.

Экспериментальное исследование спектра частот на основе изучения дифракции рентгеновских лучей или откликов от потока нейтронов позволило установить, что для частиц жидкого галлия (*Ga*) частота составила $1,5 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$. При переходе в твёрдое кристаллическое состояние частотный режим смещается в область больших значений $2,0 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$. Подобные данные были получены также для других молекул (аргон, вода). Период между трансляционными перескоками имеет большую величину ($\tau_1 = 10^{-10} \text{ сек}$). Полученная разница показывает, что каждая молекула совершает около 100 колебаний относительно одного и того же положения равновесия, прежде чем переменить своё место.

Аналогичных показателей частотного режима удаётся достичь и расчётным путём для атомов чистого алюминия (с ГЦК решёткой) - $10,0 \times 10^{12} \text{ Гц}$ или для частиц в квазикристалле более сложного состава на основе алюминия ($i - \text{Al}_{0,62}\text{Cu}_{0,255}\text{Fe}_{0,125}$) - $14,0 \times 10^{12} \text{ Гц}$.

Вторая стадия связана с понижением температуры жидкости до температуры фазового превращения, при которой увеличивается плотность жидкой фазы, и колебательное движение атомов способствует объединению их в отдельные кластеры, число которых растёт с образованием многочисленных группы и конгломератов из большого числа кластеров.

Экспериментальные исследования рентгенографическим методом структуры жидкого расплава одноатомной жидкости вблизи температуры плавления, согласно данным многочисленных работ, подтверждают некоторое соответствие свойств жидкости свойствам твёрдого тела, несмотря на то, что жидкость – это система более динамичная.

На протяжении нескольких атомных слоёв в жидкости происходит формирование ближнего порядка в расположении атомов, которое подобно их расположению в кристаллической решётки твёрдого тела.

Формирование ближнего порядка связано с тем, что даже при температурах перегрева ($40...60^\circ \text{C}$, иногда до 300°C) в расплаве образуются устойчивые конгломераты атомов в виде кластеров небольших размеров. В объёме $1,0 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ расплава алюминия, например, может содержаться $2,5 \times 10^{14}$ кластеров, что для зародышевой зоны объёмом $0,5 \times 10^{-9} \text{ м}^3$ при сварке позволит достигнуть величины $1,25 \times 10^{11}$ кластеров.

Зародыши в виде кластеров в металле могут представлять собой куб с усечёнными вершинами (содержащий до 305 атомов одного элемента) (Рис. 1,а), либо кластер более сложного строения (содержащий 3579 или 3655 атомов в каждом) (Рис. 1,б), включающий два элемента с различным кристаллографическим строением решёток. Встречаются зародыши в виде так называемых мицелл (Рис. 1,в), которые с изменением температуры меняют свою упорядоченность частиц и перестраиваются в энергетически более стабильные икосаэдрические симметричные комплексы.

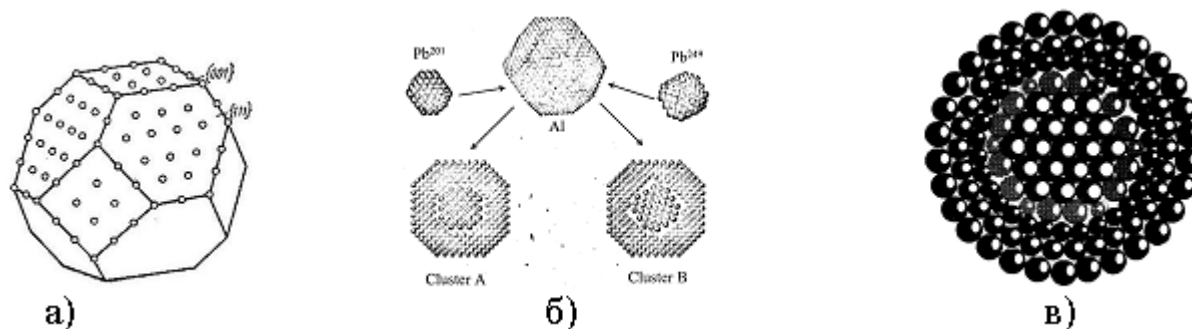


Рис. 1. Схематическое строение зародышей в жидком металле: а – гомогенный зародыш с решёткой гранецентрированного куба; б – кластеры двух типов в алюминиевой матрице; в – наномицеллы с плотной упаковкой атомов

Размер критического радиуса ($r_{кр}$) зародыша, например, для кластера кремния в расплаве алюминия, можно оценить по формуле:

$$r_{кр} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot T_0 \cdot V}{L \cdot \Delta T} = \frac{2 \cdot 0,68 \cdot 843}{2,4 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 1,6 \cdot 10^6} = 50 \times 10^{-9} \text{ м}, \quad (1)$$

где σ - поверхностное натяжение на границе «кристалл-расплав» ($680 \text{ мДж} / \text{м}^2$); V - удельный объём кристалла; L - скрытая теплота межфазного перехода; T_0 - равновесная температура плавления (570°C или 843°K); ΔT - термическое переохлаждение жидкой фазы (-6°C).

Диаметр кластеров $\leq 100 \times 10^{-9} \text{ м}$ представляет собой критическую величину наноструктурного устойчивого образования, размер которого служит переходом от микро - к макро-масштабу и наоборот.

Кластеры расплава могут представлять собой при определённом размере центры кристаллизации (ЦК) и содержать не только совокупность частиц в виде электронов, ионов и атомов, но и вакансии. Критический размер кластера, содержащего от 305 атомов до 3650 атомов, можно определить также из другого выражения

$$r_c = \frac{2 \cdot V \cdot \sigma}{k_B \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_0}{c_0}\right)}, \quad (2)$$

где k_B - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура;

N_0 - концентрация вещества в объёме раствора;

σ - коэффициент поверхностного натяжения;

c_0 - постоянная с размерностью концентрации при реакции растворимости нулевого порядка.

В зависимости от количества атомов кластера меняется его размер, который определяет устойчивость состояния и, соответственно, возможность роста или распада (Рис. 2).

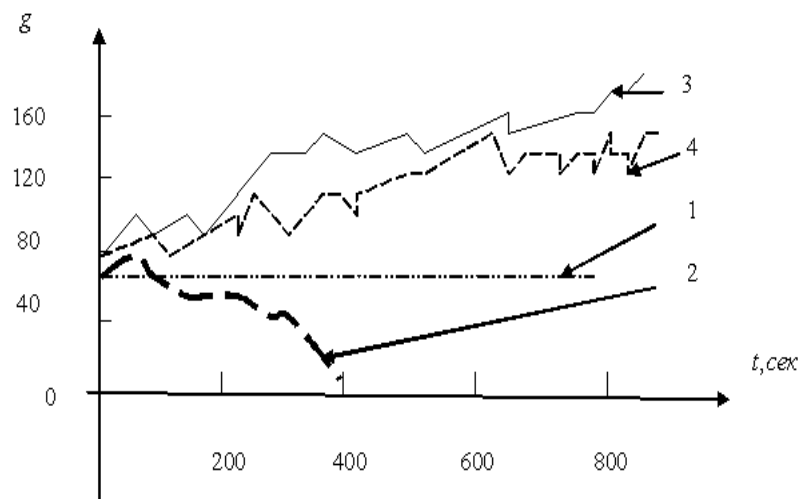


Рис. 2. Зависимость размеров кластеров (g) от времени (t) для различных начальных размеров (цифрами указано количество атомов в кластере) [5]:
1 – $g = 60$; 2 – $g = 64$; 3- $g = 77$; 4 - $g = 70$.

Объединяя кластерную модель жидкости и общепринятую оболочечную модель электронной структуры кластеров, можно предположить, что свободно блуждающие кластеры с ростом их численности и размеров начинают взаимодействовать друг с другом по средствам устойчивой замкнутой оболочки из поверхностных валентных электронов. Эта оболочка образуется вокруг остова из ионов и оказывает влияние на время жизни конгломерата, которое может составлять $(10^{-5}...10^{-8})сек$ и меняться в зависимости от частоты столкновений, увеличиваясь тем самым до сравнительно больших величин $(10^{-2}...10^{-3})сек$.

Колебания кластеров не подменяют в жидкости тепловых колебаний отдельных атомов и существуют в жидкости одновременно. Вычисленные частоты колебаний кластеров на четыре порядка меньше частоты для отдельных атомов и составляют: для алюминия (Al) $4,4 \cdot 10^8 сек^{-1}$, для железа (Fe) - $10,0 \cdot 10^8 сек^{-1}$.

В то же самое время наличие в кластере вокруг остова из ионов устойчивой замкнутой оболочки из свободных валентных электронов определяет не только структуру конгломерата в целом, но и характер его поведения в процессах взаимодействия. Внешняя электронная система совершает собственные колебания, которые отсутствуют для

отдельных атомов, и носят название «плазменных», поскольку аналогичны колебаниям электронного газа в плазме.

Частота электронных колебаний отлична от частот в макроскопических образованиях и имеет сложную структуру. По предварительной оценке величина их может составлять $4,9 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$ и изменяться в зависимости от плотности электронов (в рамках классической физики):

$$\Omega = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot e^2}{3 \cdot m}}, \quad (3)$$

где e, m – заряд и масса электрона, соответственно; n – плотность электронов в кластере.

Третья стадия является заключительной и соответствует фазовому превращению. Переход через межфазную границу осуществляется одномоментно в виде перемещения слоя кластеров некоторой толщины после установления соответствующих условий. При достижении некоторого критического значения частоты ($\omega_k = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot t_c^{-1}$) динамическое состояние кластерных групп становится неустойчивым и наблюдается «срыв», когда слой кластеров определённой толщины оседает, поскольку линейная скорость каждого конгломерата становится равной нулю в результате полной диссипации подводимой извне энергии. Величина критической частоты (f^*) при увеличении размера кластеров убывает со 170 Гц до 60 Гц [6], характерных для условий сварки.

Имитация в феноменологической модели поэтапного послойного оседания или перехода многочисленных групп частиц из возбуждённого колебательного движения в неподвижное состояние, позволяет на основе киносъёмки рассматривать переход подобного рода, как переход через межфазную границу при кристаллизации металла. Такой переход происходит за счёт установления критической частоты воздействия электромагнитного поля системы на заряженные кластеры [6], что согласуется с механизмом послойной кристаллизации металла шва при сварке.

Таким образом, при переходе через межфазную границу происходит постепенная трансформация частотных механизмов, начиная с частоты колебаний отдельных атомов $f_0 = (0,71 \dots 14,0) \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, поэтапно переходящих к частоте послойного перехода $f_{кр} = (60 \dots 170) \text{ Гц}$.

Изменение геометрических размеров зародышевой зоны в микромасштабе.

Зона, где реализуются закономерности процесса перехода вещества через межфазную границу в рамках феноменологической модели, расположена перед фронтом кристаллизации сварочной ванны.

Протяжённость этой зародышевой зоны у линии сплавления ванны составляет величину $(0,14...0,5) \times 10^{-3} \text{ м}$, которая постепенно увеличивается к осевой части шва до размера $(0,4...0,5) \times 10^{-3} \text{ м}$ в стали *IX18H10T*. Ширина слоя по оси ванны в 2...3 *раза* больше протяжённости зоны концентрационного переохлаждения, что выявляет соответствующую разность объёмов $\approx 1,25 \text{ мм}^3$ и $\approx 0,5 \text{ мм}^3$ соответственно.

В этой зоне жидкого металла, непосредственно прилегающей к межфазной границы, отсутствует какое-либо турбулентное движение потоков расплава хвостовой части сварочной ванны [7].

Металлографические исследования микроструктуры шва позволили выделить слои в виде:

- 1) равноосных ячеек (Рис.3,а,б);
- 2) вытянутых, столбчатых ячеисто-дендритных образований (Рис. 3,а,б);
- 3) при форсированных режимах сварки в осевой части шва образуются крупные полиэдры в форме равноосных кристаллитов с дендритной структурой, либо формируется осевой кристаллит с характерной периодичностью структуры.

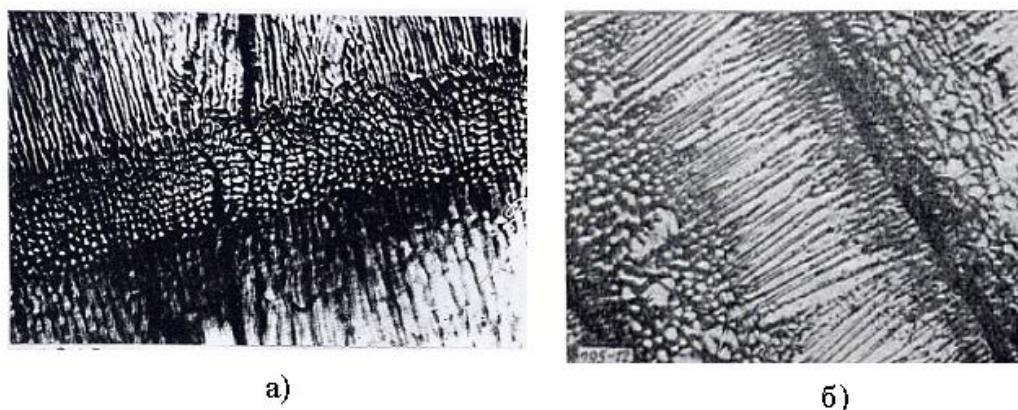


Рис. 3. Характерная периодичность в микроструктуре со стороны свободной поверхности шва при колебаниях скорости кристаллизации:

- а - алюминиевый сплав ($Al + 3,0\%Cu$), сварка со скоростью $V_{св} = 1,37 \times 10^{-2} \text{ м/сек}$, $\times 200$;
 б - сплав ($Al + 2,0\%Cu$), $\times 170$ [8].

При сохранении строгой последовательности повторения слоёв, их протяжённость меняется в зависимости от технологических параметров процесса сварки, природы металла и содержания, входящих в его состав химических элементов. Так слои, содержащие равноосные ячейки могут наблюдаться не только в алюминиевых сплавах (Рис.3), но также в сталях, например, системы ($Fe + 0,27\%C$).

Ширина слоя (a) ячеек зависит от условий сварки и изменяется при увеличении скорости по зависимости с максимальной точкой (Рис. 4, кривая 2). В микроструктуре сплавов системы ($Al + Cu$) с содержанием меди от 0,5% до 3,0%, приведенной выше (Рис. 3,а), отчетливо можно различить две зоны: зону равноосных ячеек и зону столбчатой ячеисто-дендритной структуры.

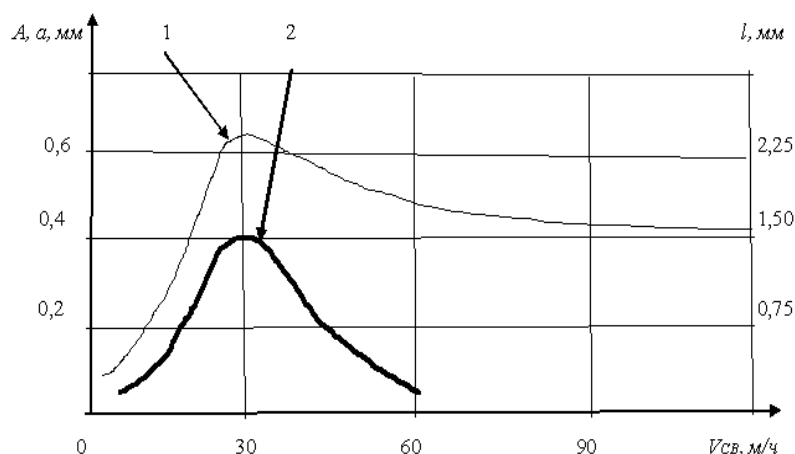


Рис. 4. Изменение геометрических размеров кристаллизационного слоя с различными структурными составляющими:

1 – ширина (A) кристаллизационного слоя по оси шва; 2 – линейный размер полос (a) с равноосными ячейками для пластин толщиной 3,5 мм.

Протяжённость первой зоны увеличивается при переходе от линии сплавления к оси шва, где достигает величины (0,08 ... 0,35) мм при скорости сварки 30 м/час (диаметр ячейки в этой зоне составляет величину (8,0...12,0) мкм вне зависимости от положения рассматриваемой точки). Причём при одних и тех же условиях большему содержанию меди в сплаве соответствует более широкий слой ячеек. Зона столбчатой ячеисто-дендритной структуры по оси шва имеет размер от 0,30 мм и более в зависимости от условий кристаллизации и состава сплава.

Такой характер чередования слоёв в микроструктуре формируется под действием периодичности в продвижении межфазной границы при затвердевании металла.

Крупные произвольно ориентированные полиэдрические кристаллы появляются при сварке на скоростях $V_{св} = 1,0 \times 10^{-2} м/сек$ (36 м/час) и более, и могут заполнять значительную часть (l) ширины шва, но при этом в этой зоне отсутствуют полосы равноосных ячеек, располагаясь ближе к линии сплавления. Можно предположить, что появление полиэдрических кристаллов связано с сильным переохлаждением и одновременным пересыщением примесными элементами жидкого расплава перед фронтом затвердевания. В таких условиях возможно возникновение произвольно

ориентированных центров кристаллизации вдали от межфазной границы, например, в алюминиевых сплавах разных систем легирования. Анализ поверхности полиэдров, на которой хорошо зафиксированы следы изотерм кристаллизации, подтверждает периодичность процесса затвердевания, которая имеет место не только на линии сплавления, но и на значительном расстоянии от неё - в осевой части ванны.

С увеличением скорости сварки количество полиэдрических кристаллов, достигнув максимальной численности, предположительно будет уменьшаться, особенно на форсированных режимах. Такой характер подтверждается экспериментально в работе [9].

Наличие колебательных механизмов движения групп частиц в зародышевой зоне расплава, при переходе через межфазную границу, диктует периодичность сложного процесса кристаллизации с трансформированной частотой. Усложнение акустической обстановки в реальной жидкой ванне при сварке напрямую связано с влиянием не только атомных колебаний, но и колебаний кластеров как отдельных образований, так и в составе множественных групп, движение которых может происходить послойно.

Управление колебательными механизмами с помощью внешнего воздействия.

Осуществляя внешнее периодическое влияние от отдельного источника (электромагнитного поля или модулирования тока и т.д.), можно эффективно управлять движением межфазной границы в процессе кристаллизации металла шва при сварке.

Согласно теории колебаний, действие двух и более механизмов возбуждения в колебательной системе могут вызывать смешанные колебания (вынужденные, параметрические и автоколебания), устойчивость которых определяется неравенством $A_p^2 \succ A_a^2 / 2$: квадрат амплитуды резонансных колебаний (A_p^2) должен превышать половину квадрата амплитуды автоколебаний ($A_a^2 / 2$).

Воздействуя внешними источниками на электронную оболочку кластеров в зародышевой зоне для целенаправленного управления смешанными результирующими колебаниями, можно регулировать не только момент перехода из жидкого состояния в твёрдое, но и степень измельчения кластерных образований в широких пределах, поскольку итоговая частота кристаллизации элемента структуры в виде дендрита на микроскопическом уровне, как показывает эксперимент составляет $f_{кр} = (0,8...215) Гц$ [10].

Возможность управления колебательным механизмом сложного и неоднозначного процесса затвердевания, доминирующую роль в котором играют внутренние причины периодичности, позволит добиться существенного улучшения свойств сварного соединения за счёт измельчения литой структуры металла шва.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Зона жидкого металла шириной в несколько атомных слоёв перед межфазной границей представляет собой зародышевую зону, в которой конгломераты атомов в виде локализованных кластеров, обладающих потенциальной и кинетической энергией, после установления термодинамического равновесия и выравнивания температуры, совершают акт одновременного перехода из жидкого состояния в твёрдое при кристаллизации металла.

2. Анализ феноменологической модели показал, что переход атома через межфазную границу в процессе затвердевания осуществляется при достижении им достаточной энергии для его активации, которая обеспечивала бы необходимую скорость передвижения при условии наличия энергетически подходящей позиции в твёрдой фазе.

3. Формирование ближнего порядка в расположении атомов в жидкости за счёт использования энергии их синхронных колебаний, а так же коллективный характер движения групп частиц создают условия лавинной или цепной реакции при межфазном переходе. В результате заполнения некоторого энергетического уровня в определённый момент происходит сброс энергии.

4. Переход частиц осуществляется послойно при установлении соответствующего частотного режима, при котором линейная скорость частиц в слое принимает нулевое значение. В этот момент энергия, подводимая от магнитного поля, компенсируется диссипацией энергии от движения и соударения частиц с учётом их вязкого взаимодействия, поверхностного трения и деформирования при изменении скорости за счёт дипольного взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Л.: Ленинградское отделение Издательства АН СССР, 1960. Т. 3. 458 с.
2. Чалмерс Б. Теория затвердевания. М.: Металлургия, 1968. 288 с.
3. Морозов В.П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. // Известие ВУЗов.: Машиностроение, 2006. №8. С. 41-54.
4. Морозов В.П. Особенности процесса формирования первичной структуры сварных швов алюминиевых сплавов различных систем легирования при совместном действии

периодического источника тепла и модификатора. // Известие ВУЗов. Машиностроение, 2006. №9. С.59-72.

5. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. М.: Высшая школа, 1980. 328 с.

6. Движение частиц при магнитоожигении в переменном поле. / Ю.А. Бувич, М.К. Болога, С.В. Сюткин и др. // Магнитная гидродинамика, 1985. №3. С. 3-12.

7. Славин Г.А. Управление структурой и оптимизация свойств сварных соединений из жаропрочных аустенитных сталей и сплавов на основе никеля : Дис. ... докт. техн. наук. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1981. 431 с., д.с.п.

8. Прохоров Н.Н., Матрюкова А.С. Первичная структура и её значение при оценке прочности металла шва.// Автоматическая сварка, 1965.- №8.- С. 15-21.

9. Механизм затвердевания при сварке и свойства получаемой структуры. Сообщение 7: Изменение кристаллической структуры металла сварного шва алюминиевых пластин./ Т. Сэнда, Ф. Матсуда, М. Като и др. Перев. с япон. статьи ВЦПНТЛД // Ёсэцу гаккай си, 1972, т.41, №1. С. 75-82.

10. Морозов В.П. Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на расплавленный металл сварного шва в процессе его кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием. technomag.edu.ru: Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. выпуск 10.URL [http:// technomag.edu.ru/issue/ 162044 html](http://technomag.edu.ru/issue/162044.html), (дата обращения 10.10.2010).

Characteristic patterns of transition of liquid molten metal in the solid state at the crystallization front in the framework of the phenomenological model.

77-30569/282085

12, December 2011

Morozov V.P.

Bauman Moscow State Technical University

VMorozov.52@mail.ru

The process of metal melt during welding with subsequent crystallization is characterized by several features. Transition of liquid melt to solid state occurs simultaneously at the interface in the so-called germ band. It is in the embryonic area that during crystallization there appears an oscillatory mechanism which is considered within the framework of a phenomenological model. Modeling the dynamics of particle motion in simple liquids confirms transition from the chaotic state of the particles into the ordered one with preliminary formation of clusters of several particles. The mechanism of layer-wise phased transition of the particles occurs at establishing a specific frequency and mode of unstable equilibrium or breakdown. Using an external source of fluctuations synchronous with the process of crystallization rate, you can control the formation of the structure by creating a resonance condition. This would be a significant improvement in the properties of welded joints by grinding the cast structure of the weld metal.

Publications with keywords: [frequency of process of crystallisation](#), [crushing of structure of a seam](#), [the frequency of an external source](#), [the effect of resonance on the structure formation](#), [welding fusion](#)

Publications with words: [frequency of process of crystallisation](#), [crushing of structure of a seam](#), [the frequency of an external source](#), [the effect of resonance on the structure formation](#), [welding fusion](#)

Reference

1. Frenkel' Ia.I., Collection of selected works, L., Leningradskoe otdelenie Izdatel'stva AN SSSR, Vol.3, 1960, 458 p.
2. Chalmers B., Theory of solidification, Moscow, Metallurgiya, 1968, 288 p.
3. Morozov V.P., Izvestiia VUZov. Mashinostroenie, 8 (2006) 41-54.
4. Morozov V.P., Izvestiia VUZov. Mashinostroenie, 9 (2006) 59-72.

5. Skryshevskii A.F., The structural analysis of liquid and amorphous bodies, Moscow, Vysshaia shkola, 1980, 328 p.
6. Iu.A. Buevich, M.K. Bologa, S.V. Siutkin, et al., Magnitnaia gidrodinamika 3 (1985) 3-12.
7. Slavin G.A., Management structure and optimization of the properties of welded joints from austenitic heat-resistant steels and alloys based on nickel (Dr.Sci.Tech. dissertation), Moscow, BMSTU, 1981, 431.
8. Prokhorov N.N., Mastriukova A.S., Avtomaticheskaya svarka 8 (1965) 15-21.
9. Morozov V.P., Nauka i obrazovanie – Science and Education 10 (2010) <<http://technomag.edu.ru/issue/162044.html>>.