

**Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на расплавленный металл сварного шва в процессе его кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием**

# 10, октябрь 2010

автор: Морозов В. П.

УДК 621.791.052:669.017.3

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва

[VMorozov.52@mail.ru](mailto:VMorozov.52@mail.ru)

**Введение.** Многие способы внешнего периодического воздействия на металл ванны при сварке, несмотря на ряд полученных положительных эффектов, не нашли широкого применения в производстве. Основной причиной, на наш взгляд, является однотипность подхода, согласно которого производилось какое-либо воздействие на сварочную ванну и затем, путём сравнений структуры шва и свойств полученного соединения, определялся характер этого воздействия.

При этом авторами преследовались цели такого плана:

- 1) достижение повышения производительности процесса сварки,
- 2) улучшение качества внешней поверхности шва или снижения пористости в литом металле,
- 3) повышение стабильности сварочного процесса и другие.

В большинстве своём авторы не ставили перед собой цель исследовать механизм периодического воздействия на процесс кристаллизации по причине его значительной сложности и, в лучшем случае, о нём высказывались предположительно. При этом в литературе отмечалось, как положительное влияние колебаний на структурообразование, так и указывалось на получение отрицательных результатов. Поэтому возникает необходимость попытаться разобраться в этом.

**Способы внешнего периодического воздействия на расплав шва.**

Из множества известных способов периодического воздействия можно выделить две основные группы: контактные способы ввода возмущения в ванну и бесконтактные. Каждая из этих групп может быть разделена по ряду других признаков.

В качестве примера из группы контактных можно привести способы ультразвуковых высокочастотных колебаний сварочной ванны, изделия или электрода, либо механических низкочастотных колебаний изделия или электрода.

Ввод механических или упругих колебаний в сварочную ванну представляет основную трудность при использовании контактных способов. Малый объём сварочной ванны и наличие источника нагрева с высокой концентрацией энергии приводит к усложнению конструкций волноводов и влияет на технологичность процесса.

Другой особенностью является эффективность механического или ультразвукового воздействия на процесс кристаллизации. Так, к примеру, для получения мелкозернистой

структуры в большинстве случаев диапазон оптимальных частот лежит в области менее 50 Гц либо более 9000 Гц. В то же самое время обработка расплава с частотой в диапазоне указанных величин не давала, как правило, положительных результатов. При этом отсутствуют какие-либо сведения, разъясняющие полученные результаты.

Использование вибраций в процессе кристаллизации металла может стимулировать зародышеобразование в переохлаждённых жидкостях. Достаточно сильный толчок, как показывают данные работы [1], может приводить к началу образования зародышей, например, в жидком никеле (*Ni*) или в переохлаждённой воде (*H<sub>2</sub>O*).

Облучение жидкой фазы ультразвуком высокой интенсивности способствует созданию условий для кавитации. Образование и захлопывание «облака» кавитационных пузырьков вблизи излучателя может быть связано с появлением скачков давления в жидком металле. Скачки давления при достижении кавитации могут достигать величины  $10^6 \text{ атм}$  [1], что превышает давление в  $10^4 \text{ атм}$  [2], необходимого для повышения равновесной температуры кристаллизации на  $100^0 \text{ C}$ , как показывает расчёт для никеля (*Ni*).

Бесконтактные способы, к которым можно отнести сварку с применением внешнего электромагнитного поля, сварку модулированным током, а также применение лучевых источников нагрева, работающих в импульсном режиме в виде светового, лазерного либо электронного луча, лишены многих указанных выше недостатков. Устройства для их реализации весьма просты, универсальны и не требуют больших изменений в технологическом процессе.

*Использование непрерывной дуги в продольном и поперечном магнитных полях с различной периодичностью.*

Применение электромагнитных полей может способствовать ограничению свободного движения жидкого металла в ванне под действием конвективных потоков, возбуждению реверсируемого движения в противоположных направлениях за счёт изменения траектории и активно влиять на структуру течения потока [3].

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на сварочном автомате АДПГ-500 можно использовать конструкцию сварочной горелки, совмещённую с соленоидом. Широкие диапазоны регулирования величины тока соленоида позволяют применять при сварке для питания дуги как переменный, так и постоянный сварочный ток.

В расплаве сварочной ванны, которая представляет собой жидкий проводник с электрическим током, при наложении продольного магнитного поля могут возникать объёмные электромагнитные силы, стремящиеся закрутить расплав вокруг оси дуги.

Комбинируя изменение сварочного тока (вектора плотности тока) и вектора напряжённости магнитного поля, можно в сварочной ванне генерировать электромагнитные силы, изменяющиеся по заданному закону.

При этом усложняется схема и конструкция источника питания соленоида, содержащая специальное коммутирующее устройство для обеспечения синхронизации тока в соленоиде и дуге.

Поведение дуги в магнитном поле, как показывает киносъёмка, носит неоднозначный характер, поскольку в этом случае происходит изменение формы и размеров её. Когда силовые линии постоянного поля параллельны оси столба дуги, происходит увеличение диаметра дуги и плазма приходит во вращательное движение. При этом температура по сечению столба распределяется равномерно, имея минимальное значение в его центральной части.

В случае же использования переменного электромагнитного поля происходит отклонение столба дуги от центра пятна нагрева при смене полярности тока соленоида, т.к. изменяется направление вращения столба дуги в противоположную сторону и

дополнительно оказывает действие электрическая сила Ампера в проводнике с током. Совместное взаимодействие силы Ампера и Лоренца способствует тому, что дуга совершает гармонические колебания малой амплитуды относительно продольной оси шва с частотой смены полярности тока соленоида.

Учитывая выше изложенные особенности поведения дуги в электромагнитном поле, можно предположить, что возможности бесконтактного способа ввода внешнего реверсируемого воздействия будут ограничены механической инерционностью движения металла. Значения частот будут зависеть от вязкости металла, которая определяет форму и размеры сварочной ванны и влияет на среднюю скорость затвердевания, то есть определяется природой сплава и режимами сварки. Это не позволяет повысить частоту колебаний более 25...30 Гц, хотя этого диапазона вполне достаточно для заметных температурных пульсаций в металле с малой температуропроводностью (сплавы на основе железа или титана). Однако собственная частота кристаллизации многих свариваемых материалов может быть существенно выше указанной.

Пределные частоты температурных колебаний за счёт теплопередачи могут достигать величины порядка (120-150) Гц для металлов с высокой температуропроводностью, например для сплавов алюминия, магния.

Эту особенность можно учесть применением импульсных режимов воздействия управляемого магнитного поля (УМП), которые позволяют существенно повысить частоту до значений более 200 Гц [4]. Диапазон частоты в этом случае регулируется поочерёдным разрядом высоковольтных конденсаторов ёмкостью 100 мкФ через водоохлаждаемую катушку индуктора, размещённую на внешней поверхности ферромагнитного сопла. Воздействие осуществляется не перемещением значительных масс жидкого металла к фронту кристаллизации, но действием температурных импульсов на межфазную границу.

Использование импульсного режима действия электромагнитного поля при сварке плавящимся электродом применяют, как правило, только для управления процессом массопереноса электродной проволоки [5] и увеличения плотности тока в ванне.

Колебания электрода или импульсный режим горения дуги эффективно влияют на перенос расплавленных капель металла, однако зачастую не согласуются с периодичностью на межфазной границе при кристаллизации. Эта особенность в конечном итоге может вызвать образование крупнозернистой столбчатой структуры.

Аналогичная особенность реализуется при сварке с модулированным током.

#### *Сварка модулированным током.*

Особенностью сварки модулированным током является температурные колебания в металле свариваемого изделия, связанные с периодическим действием амплитудного значения тока, и динамическое силовое воздействие давления со стороны изменяющейся формы дуги.

Интенсивность воздействия на межфазную границу определяется тепловой ситуацией и зависит от амплитудного значения тока, длительности импульса, расстояния от места приложения воздействующей на ванну силы до фронта кристаллизации и теплофизических характеристик жидкого металла. Чем больше расстояние от места приложения импульсной силы до межфазной границы, тем больше должны быть амплитудные значения тока и длительность импульса, при прочих равных условиях.

Очевидно, что с уменьшением длительности импульсов или частоты их следования тепловой эффект будет уменьшаться. Пульсаций температуры практически не наблюдается уже на расстоянии (0,1...0,2) см от межфазной границы при воздействии амплитудного значения тока  $I_u \leq 900 A$  и длительности импульса  $t_u < 0,015 \text{ сек}$ , действующего с частотой  $f_u \leq 25 \text{ Гц}$ .

В то же самое время в условиях минимального теплового действия при наложении на дугу мощных кратковременных импульсов тока будет изменяться гидродинамическое состояние ванны.

В результате механического воздействия импульсов тока на сварочную ванну в ней возникают волны, которые распространяются от активного пятна дуги к периферии ванны. При возникновении волн в движущемся жидком металле сохраняется направленная теплопередача из зоны перегрева к межфазной границе. Вероятно, появление волн вызывает пульсирующий характер движения металла к межфазной границе, который может при оптимальных параметрах импульсов тока приводить к оплавлению уже затвердевшего металла шва. Этот эффект может наступать, как показывает киносъёмка, через  $(0,01 \dots 0,02)$  сек после действия импульса тока.

Давление дуги изменяется в соответствии с формой импульсов тока (синусоидальной, прямоугольной или треугольной) и синхронизируется вплоть до частоты  $300 \text{ Гц}$  [6].

Между действием импульса тока и развиваемым им усилием, при сварке модулированным током наблюдается сдвиг по времени, который возникает вследствие инерционности теплового механизма и механической системы движения металла.

Вторым важным моментом, который необходимо учитывать при установлении характерных особенностей процесса, является амплитуда пульсаций сварочного тока [6]. Чрезмерное превышение амплитудных значений приводит к образованию дефектов сварного шва в виде избыточного усиления и более глубокого и узкого проплавления.

Частота колебательного движения поверхности металла шва по некоторым оценкам зависит от геометрических параметров ванны, поверхностного натяжения металла, жидкотекучести и плотности свариваемого металла [6]. В этом случае, по нашим представлениям, возникает необходимость согласовывать температурные колебания от дугового источника и тепловых колебаний за счёт волнового массопереноса расплава от действия давления дуги. Определяющую роль будет играть частота наложения импульсов тока. Необоснованный выбор частоты приводит к образованию не только протяжённых областей скопления неметаллических включений, но и к повышению вероятности образования микротрещин [7].

Согласованность частот зависит от расстояния между местом приложения импульсного давления до фронта кристаллизации в хвостовой части сварочной ванны. Это расстояние должно изменяться в зависимости от теплофизических свойств материала.

Во время работы на переменном токе, например с использованием источника питания ИМИ-1, подача импульсов тока синхронизируется со временем прохождения одной из полуволн тока основной дуги. Эта особенность ограничивает возможность плавного регулирования частоты импульсов за счёт жёсткой привязке к промышленной частоте источника тока.

Амплитудные значения тока можно определить с помощью эмпирической зависимости, включающей глубину проплавления и расстояние между электродами [8]:

$$I_a = (400 \dots 700) \cdot \delta_{np} - (30 \dots 70) \cdot x_s, \quad (1)$$

где  $\delta_{np}$  – глубина сварочной ванны, мм;

$x_s$  - расстояние между электродами, мм.

Длительность импульса зависит от вязкости жидкого металла и может изменяться, например, от  $(0,8 \dots 1,5)$  мс для стали ВНС-2 до  $(6,0 \dots 8,0)$  мс для сплавов на основе никеля [8].

Поэтому при проектировании генераторов возмущений необходимо в первую очередь учитывать собственную частоту процесса кристаллизации металла, позволяющую научно обосновать рациональные области их применения.

### Микроструктура свободной поверхности сварного шва после аргоно-дуговой сварки.

Исследуя микроструктуру чистого алюминия (Рис. 1), можно указать на регулярную периодичность при послойном образовании структурных составляющих различной формы. Периодичность согласуется как с образованием макромасштабных изменений рельефа внешней поверхности шва в виде чешуек (Рис.1,а), так и с кристаллизацией слоёв различной травимости в форме изотерм плавления в микромасштабе (Рис.1,б). Подобные изменения на поверхности металла могут быть связаны с неравномерным передвижением фронта кристаллизации.

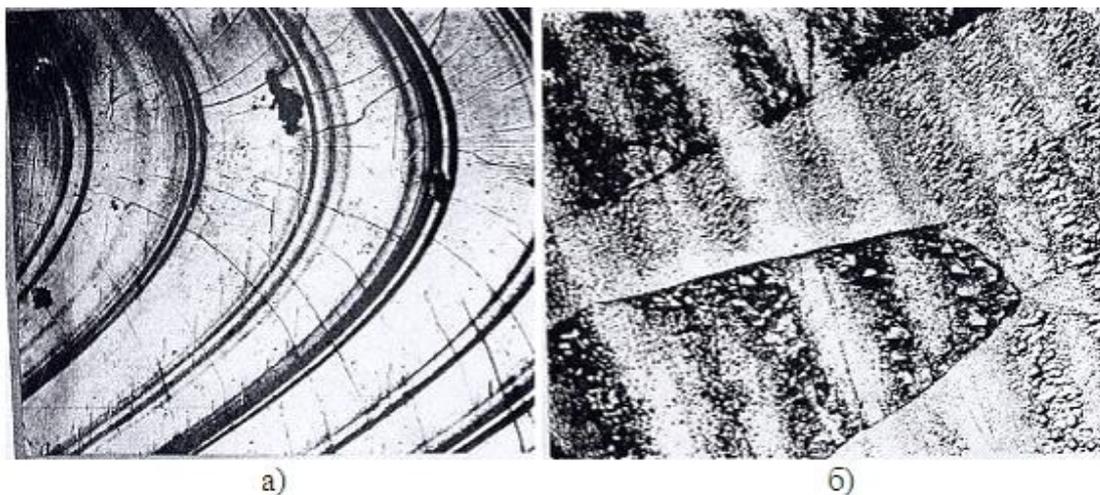


Рис. 1. Микроструктура свободной поверхности сварного шва после аргоно-дуговой сварки:

а - чистый алюминий *AB 000*, сваренный со скоростью  $V_{св} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ м/сек}$ ,  $\times 70$ ;

б - травленая поверхность чистого алюминия *AB 0000* при  $V_{св} = 0,42 \times 10^{-2} \text{ м/сек}$  ( $15 \text{ м/час}$ ),  $\times 200$  [9].

Неравномерность передвижения межфазной границы, связанная с существованием колебательного механизма процесса кристаллизации металла шва, можно зафиксировать с помощью замера термических циклов. При этом важно проанализировать возможности управления процессом затвердевания с помощью внешнего периодически действующего источника.

### Характерные изменения выходных параметров процесса кристаллизации.

Наличие внешнего источника периодических возмущений в виде электромагнитного поля, модуляции сварочного тока или механических колебаний дуги будет оказывать влияние на характер изменения параметров процесса кристаллизации. В этом случае может изменяться амплитуда температурных колебаний на межфазной границе, вызывая тем самым повышение или понижение градиента температур и мгновенной скорости кристаллизации. Будут меняться линейные размеры двухфазной зоны перед фронтом затвердевания и глубина проплавления свариваемого металла, поскольку изменится термическое и концентрационное переохлаждение расплава, а также величина коэффициентов диффузии химических элементов.

В этом случае возникает необходимость согласовывать температурные колебания от дугового источника и тепловых колебаний за счёт волнового массопереноса расплава от действия давления дуги.

Определяющую роль играет частота наложения импульсов тока. Необоснованный выбор частоты приводит к образованию не только протяжённых областей скопления неметаллических включений, но и к повышению вероятности образования микротрещин [7].

Поэтому необходимо в первую очередь учитывать периодичность процесса кристаллизации, позволяющую научно обосновать рациональный диапазон частот при их выборе и применении.

#### 1. Изменения амплитуды температурных колебаний и градиента температуры.

Периодичность при кристаллизации можно определить с помощью изменений температуры. Отсутствие синхронности при действии различных частотных механизмов вызывает, как указывает теория автоволновых процессов [10], их рассогласованность, вплоть до почти полного подавления температурных изменений.

Модельные испытания с записью осциллограмм температуры в хвостовой части эллипсоидной ванны расплава проводились с использованием экспериментального сплава Вуда. При различных частотах внешнего воздействия реверсируемого электромагнитного поля (ЭМП) на расплав средняя температура в точках, расположенных ближе к центру ванны, понижается по сравнению с невозмущённой, а на периферии ванны – повышается. При этом мгновенные значения температуры в точке на межфазной границе и градиент температуры вблизи границ ванны начинают колебаться с частотой реверсирования поля. Можно наблюдать, что интервал изменений температуры меняется от минимальных значений  $\Delta T = (6...10)^{\circ}C$ , характерных для однонаправленного движения жидкого металла при действии постоянного поля, до максимальных величин порядка  $\Delta T = 42,9^{\circ}C$  при некоторой критической частоте (Рис. 2) [11].

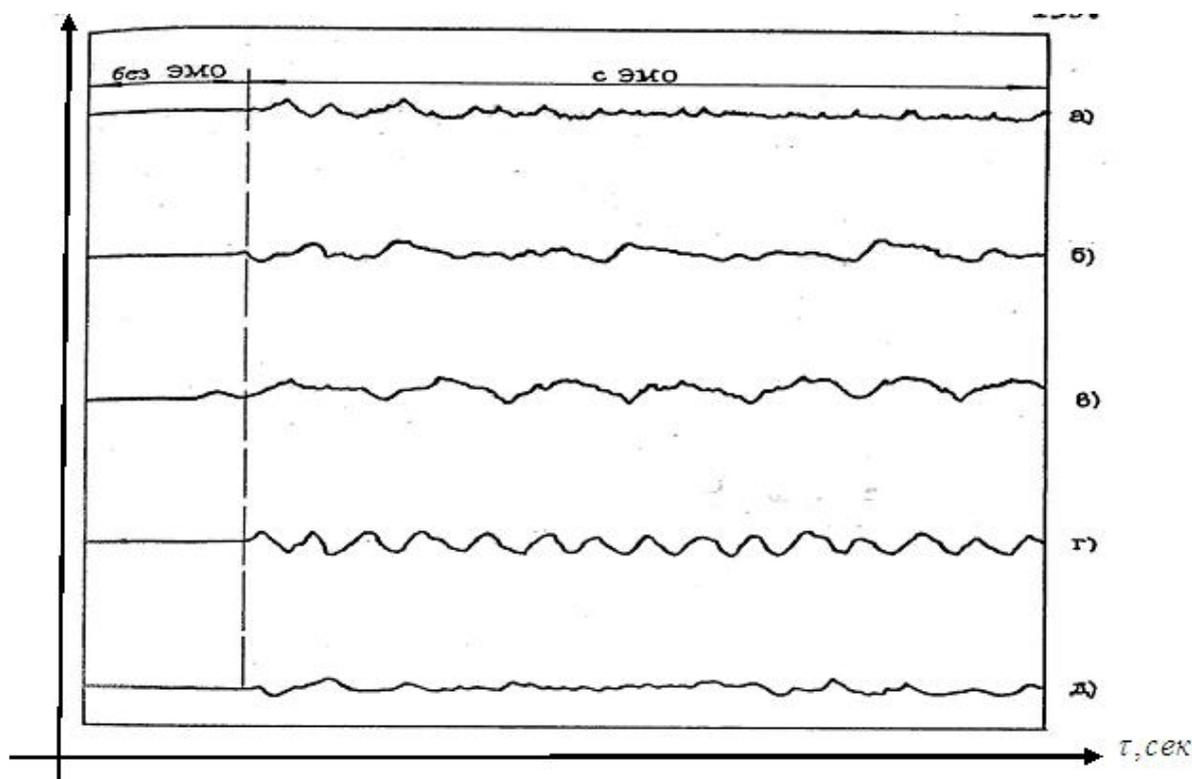


Рис. 2. Осциллограммы изменения амплитуды температурных колебаний в зоне кристаллизации модельного сплава Вуда [11]:

- а – однонаправленное движение жидкого металла сплава с колебаниями температуры  $\Delta T = (6 - 10)^\circ C$  ;
- б – время действия импульса  $t_u = 2 \text{ сек}$  при реверсируемом движении расплава под действием ЭМП с  $\Delta T = 19^\circ C$  ;
- в -  $t_u = 1,0 \text{ сек}$  с  $\Delta T = 42,9^\circ C$  ;
- г -  $t_u = 0,5 \text{ сек}$  с  $\Delta T = 31,6^\circ C$  ;
- д -  $t_u = 0,1 \text{ сек}$  с  $\Delta T = 19^\circ C$  .

При действии синхронной частоты эти колебания по виду соответствуют гармоническому закону. В случаях отклонения от синхронности вид колебаний существенно отличающиеся от указанного закона. Это свидетельствует о рассогласованности в действиях различных частотных механизмов.

Амплитудные отклонения температуры от точки ликвидуса в сторону переохлаждения, создают условия для ускоренного роста твёрдой фазы. Отклонения в противоположном направлении согласуются с моментом выделения тепла кристаллизации, которые снимают переохлаждение и замедляют продвижение фронта, тем самым.

Другим экспериментальным подтверждением являются примеры сварки стали *1X18H9T*, которые представлены в работе [12]. Согласно этим данным при электромагнитном перемешивании сварочной ванны температура в зоне кристаллизации колеблется с частотой реверсирования магнитного поля и с размахом до  $(200...270)^\circ C$  . Колебания температуры с увеличением частоты реверсирования затухают и при интервале реверсирования  $\tau_p = 0,08 \text{ сек}$  практически не отличаются от колебаний температуры при обычной сварке.

## 2. Изменения мгновенной скорости кристаллизации и линейного перемещения межфазной границы.

Микроскопические исследования, проводимые с помощью скоростной кино- видео съёмки, показали некоторые особенности в передвижении границы раздела фаз. Однако ещё совсем не ясно, какова будет тепловая ситуация при действии дополнительного источника внешних низкочастотных колебаний во время кристаллизации металла.

Предварительные исследования кристаллизации модельного сплава двухкомпонентной системы  $(90\%NaNO_3 + 10\%KNO_3)$  показывают, что частотный режим изменения мгновенной скорости затвердевания имеет некоторую периодичность, которая определяется частотой  $(8,0...12,0) \text{ Гц}$  (Рис.3) [11].

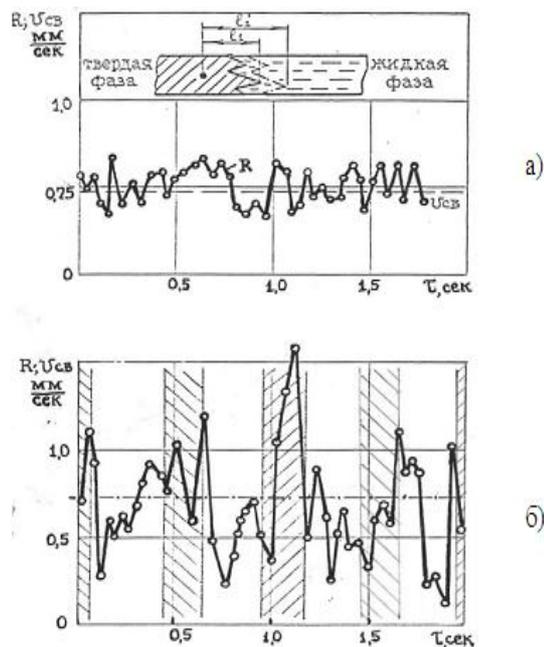


Рис. 3. Циклограммы изменения мгновенных значений скорости кристаллизации прозрачного модельного сплава из двухкомпонентной системы ( $90\% \cdot NaNO_3 + 10\% \cdot KNO_3$ ):

Г а - при  $V_{cg} = 0,75$  мм/сек без колебаний нагревателя;

Б б - с поперечными колебаниями нагревателя с частотой  $1,0$  Гц и амплитудой  $3,0$  мм .

кристаллизации с частотой в  $1,0$  Гц и амплитудой  $3,0$  мм вызывает некоторые изменения. При сохранении частотного режима в отдельные моменты времени наблюдается либо усиление значений мгновенной скорости кристаллизации с  $1,0$  мм/сек до  $1,6$  мм/сек или ослабление с  $0,52$  мм/сек до  $0,13$  мм/сек (Рис. 3). Это показывает возможность эффективного влияния на процесс кристаллизации извне.

Линейное перемещение межфазной границы в осевом направлении можно зафиксировать с помощью скоростной киносъёмки при соответствующем увеличении оптической системы. Таким же образом можно определить и характерные изменения движения фронта при ускорении или замедлениях его перемещений в случае внешнего дополнительного воздействия.

Периодичность процесса кристаллизации металла шва при сварке, определяется собственной частотой, зависящей от системы легирования сплава, скорости сварки, толщины соединяемых образцов, которые в общей сложности определяют тепловые условия на границе раздела фаз. Дополнительный источник внешних тепловых колебаний может оказывать как синхронное воздействие по отношению к механизму собственных колебаний, так и действие в противофазе. При этом предполагаемый результат может носить не только различный, но иногда прямо противоположный характер.

Так, вертикальные колебания горелки, способствующие периодическому увеличению или уменьшению длины дуги с помощью эксцентрикового механизма [13], оказывали воздействие на расплав, равнозначное процессу сварки с модулированными импульсами тока [14].

Вертикальные колебания горелки с амплитудой от  $1,0$  мм до  $5,0$  мм в диапазоне частот ( $0...30$ ) Гц приводят к колебаниям в расплаве температуры и давления, оказываемого дугой на металл. Типичные изменения кинетики движения фронта кристаллизации приведены на Рис. 4 [13].

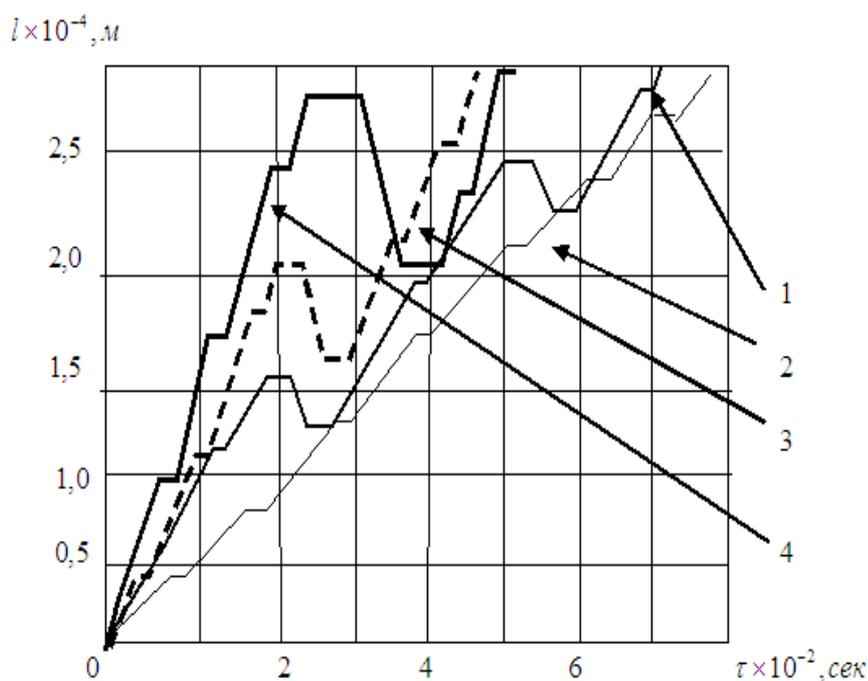


Рис. 4. График зависимости перемещения межфазной границы от частоты вертикальных колебаний дуги при сварке сплава  $10X11H20T2P$  толщиной  $2\text{ мм}$ :

1 -  $f_{\text{внеш}} = 10,0\text{ Гц}$ ; 2 -  $f_{\text{внеш}} = 12,0\text{ Гц}$ ; 3 -  $f_{\text{внеш}} = 18,0\text{ Гц}$ ; 4 -  $f_{\text{внеш}} = 24,0\text{ Гц}$   
(соответствует  $f_{\text{внеш}} = 0\text{ Гц}$ ).

Дальнейшее увеличение частоты внешнего источника приводит к тому, что амплитуда скачков уменьшается. Одновременно снижается и величина подплавленного участка шва при движении фронта в обратном направлении (Рис. 4). При частоте в  $12\text{ Гц}$  участки подплавления, связанные с выделением скрытого тепла, совсем исчезают. При двукратном повышении частоты внешнего источника до величины  $24\text{ Гц}$  амплитуда скачков становится приблизительно равной таковой для обычных условий сварки. Наклон кривых меняется, указывая на изменения мгновенной скорости кристаллизации и соответствующего периода полного цикла.

Такого же рода особенности можно наблюдать при сварке ряда сталей  $Ст.3$ ,  $40ХН$ ,  $15ХСНД$ , а также технически чистого *армко-железа*, при кристаллизации которых выделившееся скрытое тепло способствует подплавлению закристаллизовавшегося шва. В этом случае тепловая волна от внешнего источника подходит к границе раздела фаз в противофазе к собственной частоте кристаллизации металла. Это характерно для материалов с малой теплопроводностью.

Другим примером аналогичного действия внешнего источника на процесс перемещения фронта кристаллизации может быть способ периодического подогрева зоны уже закристаллизовавшегося металла [15]. При сварке алюминиевого сплава марки  $1915$  или  $1925$  перитектической системы действие внешнего источника со стороны твёрдого металла вызывало увеличение продолжительности остановок.

Таким образом, подтверждается возможность управления процессом кристаллизации с помощью внешнего периодически действующего источника.

### 3. Влияние периодичности внешнего воздействия на результирующую частоту процесса кристаллизации.

Особенности надмолекулярных структур твёрдого тела, полученных путём затвердевания из жидкой фазы, в значительной мере зависят от устойчивости фронта кристаллизации по отношению к возмущениям разной природы.

Взаимное действие двух частотных механизмов: внутреннего механизма процесса кристаллизации металла на межфазной границе и внешнего периодического теплового воздействия от независимого источника, как показывает теория колебаний [16], может вызывать эффект взаимной конкуренции либо синхронизацию, а также биение, многомодовые режимы, стохастичность [17]. Причём последние случаи развиваются в рамках теории самоорганизации или синергетики, имеющих место в неравновесных системах в форме автоволновых процессов (АВП).

Эффект конкуренции различных возмущений при нелинейном их взаимодействии может быть связан с поочерёдными затуханиями колебаний каждого из конкурентов.

При синхронизации в ансамбле взаимодействующих возмущений результирующее движение может оказаться с вполне определённым периодом развития динамики слоя расплава перед межфазной границей.

Примером реализации выше изложенного может быть процесс сварки стали ЭИ 696А (10Х11Н20Т2Р) толщиной 2 мм с вертикальными колебаниями сварочной горелки [13]. Взаимодействие внутреннего периодического механизма кристаллизации металла шва и внешних колебаний горелки способствовали изменениям результирующей частоты, которые можно проследить на Рис. 5. При частоте внешне приложенных колебаний теплового источника, равной 12 Гц и соответствующей собственной частоте кристаллизации металла шва для выбранных условий сварки, происходит существенное усиление численных значений результирующих колебаний (Рис.5), что позволяет предположить реализацию эффекта синхронизации двух частотных механизмов.

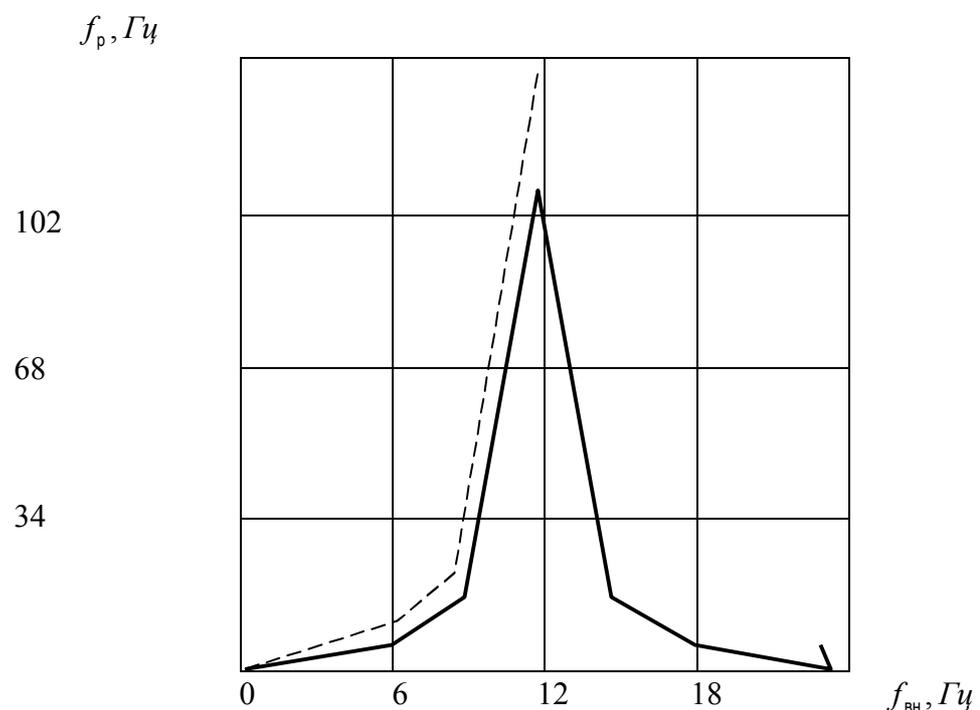


Рис. 5. Зависимость результирующей частоты колебаний фронта кристаллизации при затвердевании от частоты внешних пульсаций сварочной горелки в процессе сварки стали 10Х11Н20Т2Р толщиной 2 мм [13]:

- — — — — экспериментальные данные;  
 - - - - - расчётные данные.

В области полной синхронизации, по расчётным данным, численные значения общей частоты достигают максимума ( $f_p = 136 \text{Гц}$ ) и, с ростом частоты внешнего воздействия в дальнейшем снижаются до минимальных величин (Рис. 5).

Другим примером усиления колебательного механизма может служить сварка импульсной дугой длительностью 0,3 сек на токе 60 А с использованием внешнего переменного электромагнитного поля (ЭМП), которое включалось только во время импульса [18] (Рис. 6).

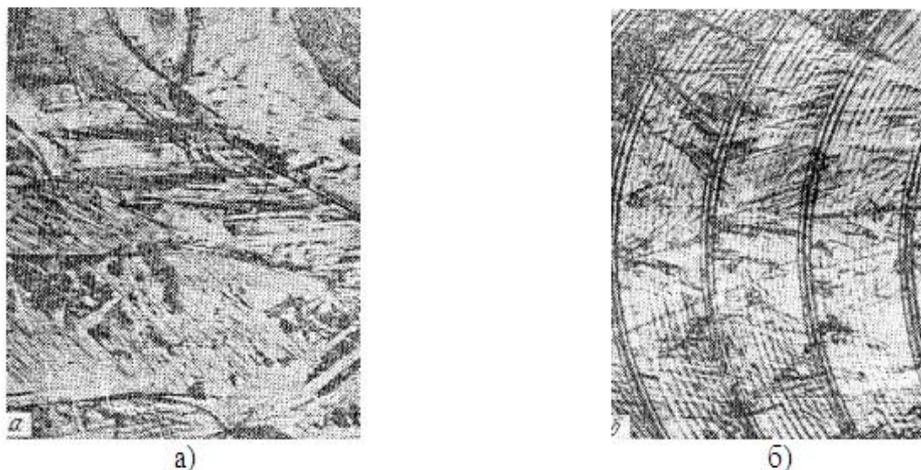


Рис. 6. Вид поверхности швов титана *BT1-0* толщиной 1,5 мм, выполненных импульсно-дуговой сваркой в обычных условиях (а) и с применением внешнего электромагнитного поля (ЭМВ) с параметрами:  $B = 20 \text{ мТ}$ ,  $t_p = 0,8 \text{ с}$  (б);  $\times 80$ , уменьшено 2/3 [18].

переменным электромагнитным полем (Рис. 6,б) по сравнению с обычными условиями (Рис.6,а). Если для обычной сварки протяжённость зоны дискретной кристаллизации составляет (35...40)% от шага точки, то при дополнительном воздействии поля (ЭМВ) размер зоны увеличивается до 115% от величины шага [18].

Аналогичного характера зависимость была получена при сварки стали *10ХСНД* толщиной 16 мм под флюсом пульсирующей дугой (СФПД) (Рис. 7) [19]. Авторы косвенно указывают на существование дополнительных факторов (кроме энергии импульса и погонной энергии сварки), которые оказывают влияние на глубину проплавления основного металла. При этом, дополнительных факторов они не называют, хотя максимальной глубины проплавления в 15 мм удалось достигнуть при синхронизации

частот. Коэффициент синхронизации ( $k_c = \frac{f_{вв}}{f_{кр}}$ ), представляющий собой отношение

частоты внешнего воздействия к собственной частоте кристаллизации металла шва на межфазной границе, достигает значений равных единице или кратных ей.

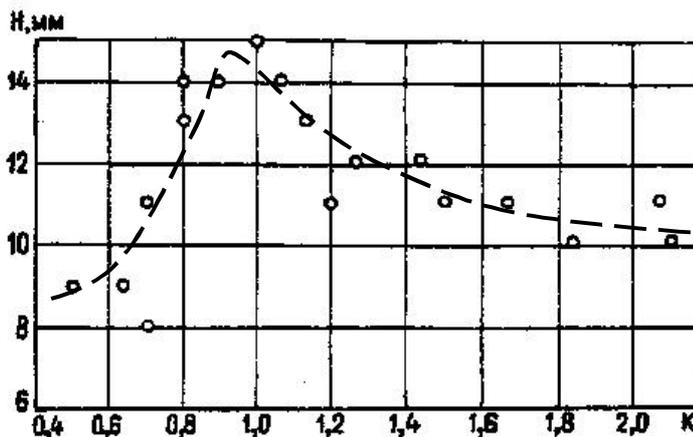


Рис. 7. Зависимость между коэффициентом синхронизации ( $k_c = \frac{f_{68}}{f_{кр}}$ ) и глубиной проплавления ( $H$ ) основного металла из низколегированной стали 10ХСНД.

#### 4. Изменение глубины проплавления основного металла.

Следующим параметром, через изменение которого можно контролировать эффективность внешнего периодического воздействия на расплавленный металл сварочной ванны является глубина проплавления ( $h_{пр}$ ).

Эффективность проплавления пластин из стали 10X18H10T и титанового сплава ПТ-3В исследовалась на продольных микрошлифах. Образцы подвергались воздействию лазерного излучения, работающего в импульсно-периодическом режиме (ИПР) [20]. Изменение частоты следования импульсов осуществлялось по линейному закону при средней мощности лазерного луча в 3 кВт с постоянной скважностью процесса ( $G = \frac{t_{п}}{t_{и}}$ ).

В интервале частот следования импульсов (360...400) Гц для скорости сварки 2,0 мм/сек наблюдалось не только наибольшее проплавление, но и качественное формирование шва (Рис. 8). Именно в этом диапазоне частот отсутствовал плазменный факел, который образуется при меньших и больших частотах [20]. Появление экстремальной точки ( $\frac{h}{P_{cp}} = 3,0 \frac{мм}{кВт}$ ) при частоте 380 Гц, авторы связывают с минимальной энергией, затрачиваемой на разрушение материала и, соответственно, с максимальным КПД процесса проплавления.

Нам представляется, что численное значение указанной частоты соответствует собственной частоте кристаллизации металла шва при выбранной скорости сварки. В точке достижения максимальной глубины проплавления реализуются условия резонанса или синхронизации частот, о чём говорилось выше.

С увеличением скорости сварки до 15,0 мм/сек, подтверждая высказанные предположения, точка максимальной глубины проплавления смещается в область более низкой частоты ( $f = 300 Гц$ ), достигая при этом несколько меньшей величины -

$\frac{h}{P_{cp}} = 1,25 \frac{мм}{кВт}$  (Рис. 8). Эта особенность ранее отмечалась нами [21].

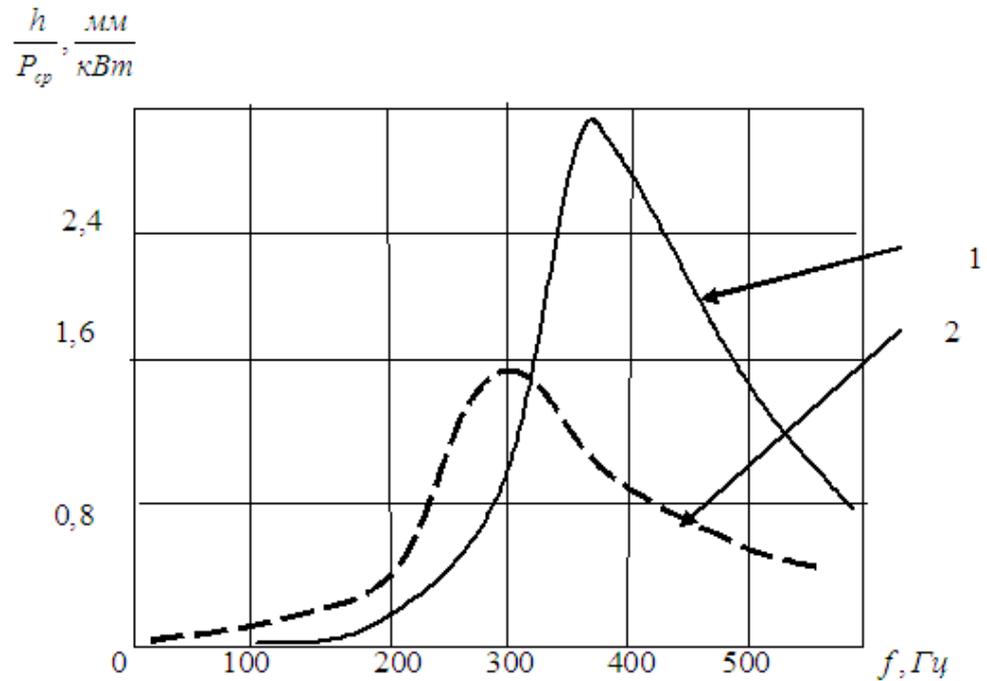


Рис. 8. График зависимости проплавляющей способности от частоты (длительности импульса) при импульсно-периодическом режиме лазерной сварки:

$$1 - P_{cp} = 3,0 \text{ кВт}, G = 4, V_{cv} = 2,0 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}; 2 - V_{cv} = 15,0 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}.$$

##### 5. Изменение коэффициента теплоотдачи и эффективной теплопроводности в одно- и двухфазной системах.

Рассматривая динамику процесса кристаллизации, как периодического процесса, естественно возникает вопрос теплопередачи энергии при воздействии внешнего колеблющегося источника тепла. Особенно эти явления могут интересовать исследователей при использовании переменного электромагнитного поля (ЭМВ), взаимодействующего с атомами и молекулами жидкого расплава сварочной ванны. Наличие внешнего поля может приводить к кондуктивной теплопередаче вдоль и поперёк вектора напряжённости этого поля, оказывая объёмное силовое воздействие на жидкость.

Передача тепла может осуществляться как за счёт теплопроводностного механизма, так и с помощью конвекции. При этом наряду с обычной гравитационной конвекцией, связанной с движением макрообъёмов в жидкости, может существовать и термоконвекция из-за неравномерного разогрева расплава.

Наличие атомов и молекул, совершающих сложное движение в жидкости за счёт поступательного перемещения с одновременным вращением вокруг собственной оси, создаёт предпосылки возбуждения микроконвективных потоков на атомарном уровне. Такого рода термомагнитная конвекция на микроскопическом уровне будет усиливаться при действии внешнего магнитного поля и способствовать превращению внутреннего вращения многочисленных групп частиц в макроскопическое движение жидкости.

Ранее экспериментально было установлено, что макротечения потоков жидкости в латентной зоне перед межфазной границей прекращаются [8] до начала процесса кристаллизации. В то же самое время периодичность на микроуровне в движении межфазной границы связана и с выделением скрытого тепла кристаллизации и с

концентрацией примеси, растворённой в жидком расплаве. Важно определить вклад каждого из приведённых параметров в процесс переноса тепла в жидкости.

Анализ результатов по исследованию свойств модельной жидкости (вода), а также изучения поведения конгломератов твёрдых ферромагнитных частиц в виде кластеров, позволяет отметить, что коэффициент теплопередачи в жидкости значительно возрастает при использовании волнового эффекта виброперемешивания [22]. Причём зависимость изменения коэффициента теплоотдачи от частоты вибрации для одно- и двухфазной среды (когда рассматривается сочетание жидкой и твёрдой фаз) имеет одинаковый характер с ярко выраженным максимумом (Рис. 9) [23]. Численное значение частоты, при которой устанавливается максимум для среды с различной плотностью, имеет разную величину (Рис. 9).

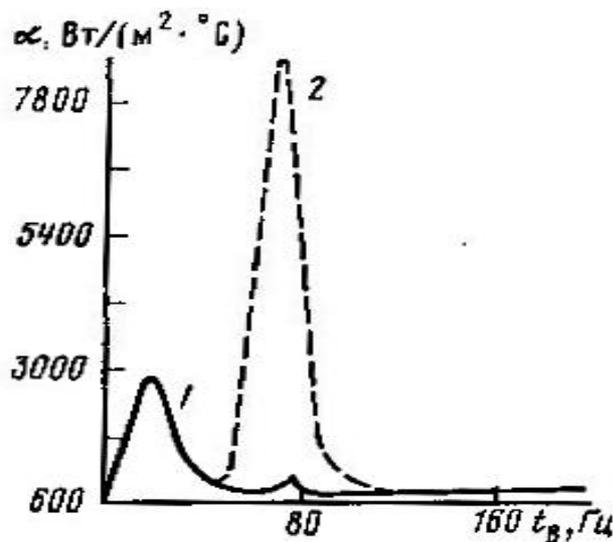


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ ) от частоты вибрации ( $t_{в}$ ) одно- и двухфазной среды [23]:  
 1 – однофазная жидкость (вода);  
 б – двухфазная жидкость (вода+воздух).

При колебаниях среды с резонансной частотой может происходить трансформация энергии с созданием условий предельной интенсификации тепломассообменных процессов, когда минимальными внешними усилиями обеспечивается максимальный съём тепла с единицы поверхности нагретого тела.

При малых частотах порядка (15...20) Гц преобладающее значение имеет общая эффективная теплопроводность, связанная с макроскопическим движением конвективных потоков в жидкости. Это имеет подтверждение при определении порядка гидродинамической частоты для выбранных условий [24]:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot \nu}{L^2} \text{сек}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость, см<sup>2</sup>/с;

$L$  - ширина теплоотдающего слоя, см.

Расчёт для керосина ( $\nu = 0,04 \text{ см}^2/\text{с}$ ) при  $L = 0,15 \text{ см}$  даёт величину,  $\omega_m \approx 10 \text{ с}^{-1}$ .

С ростом частоты колебаний до значений в 100 Гц и более макроскопическое движение подавляется и становится равным микроконвективному, при котором определяющее значение в теплопроводностном режиме имеет характер движения

конгломератов и групп из частиц. Согласно проведённой в работе [24] оценки приращения эффективной теплопроводности можно определить безразмерным комплексом:

$$P = \frac{l^2 \cdot \omega_0}{a}, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  - окружная скорость вращения частиц относительно жидкости,  $сек^{-1}$ ;

$a$  - температуропроводность жидкости,  $см^2 / с$ .

Численное определение значений комплекса, например, для керосина ( $a = 8,5 \cdot 10^{-4} см^2 / с$ ) с учётом экспериментально полученных значений окружной скорости  $\omega_0 \approx \omega = 100 сек^{-1}$  показывает, что для частиц размером  $\approx 10^{-6} см$  в жидкости микроконвективный теплоперенос практически отсутствует ( $P \approx 10^{-7}$ ), в то время как для конгломератов частиц размерами  $l \approx 20 мкм$  микроскопические потоки являются определяющими ( $P \approx 0,4$ ) [24].

Таким образом, влияние внешнего периодически действующего источника нагрева на расплавленный металл сварочной ванны в процессе кристаллизации вызывает существенное изменение амплитуды температурных колебаний, скорости охлаждения, мгновенных значений скорости кристаллизации при передвижении межфазной границы.

Характерной особенностью при кристаллизации в таких условиях является существенное усиление коэффициента диффузии химических элементов, входящих в состав металла, способствующих неоднозначному изменению критерия концентрационного переохлаждения и, что особенно важно в условиях резонанса – это усиление процессов теплоотдачи и теплопроводности при минимальном вложении извне.

Действие внешнего источника синхронно процессу кристаллизации, не изменяя результирующую частоту кристаллизации, существенно измельчает структуру основного металла в зоне термического влияния, а так же первичное зерно литого металла шва.

### **Разработка нового способа управления структурообразованием при кристаллизации металла шва и зоны термического влияния.**

В основу нового способа измельчения структуры положена собственная частота кристаллизации металла, соответствующая неравновесным термодинамическим условиям сварки [21].

Установив собственную частоту кристаллизации жидкого металла, соответствующую его теплофизическим свойствам с учетом характера источника тепла, можно осуществить управление процессом затвердевания с помощью принудительного внешнего воздействия с той же частотой. В этом случае реализуется явление резонанса, позволяющее создать условия образования дополнительных центров кристаллизации и обеспечить тем самым получение мелкозернистой равноосной структуры. Образование дополнительных центров кристаллизации перед межфазной границей обеспечивается за счет получения высокой степени переохлаждения расплава, недостижимой при обычных условиях сварки.

В качестве внешнего источника колебаний может использоваться модуляция сварочного тока, механические и дополнительные электромагнитные колебания дуги, реверсирование магнитного поля, бесконтактно воздействующего на металл сварочной ванны, механическая вибрация сварного изделия и другие.

Выбор источника внешнего периодического воздействия необходимо проводить не только с определением места его расположения по отношению к межфазной границе в сварочной ванне, но следует также учитывать систему легирования металла.

Воздействие может проводиться как со стороны расплава по отношению к границе, так и со стороны затвердевшего металла шва. В результате взаимодействия внешнего

частотного механизма и собственной внутренней частоты кристаллизации возможны следующие ситуации:

- 1) синфазное воздействие будет увеличивать температурные колебания в расплаве, и усиливать, тем самым, степень термического переохлаждения с одной стороны и величину перегрева металла с другой;
- 2) воздействие в противофазе будет снижать не только среднюю температуру, но и градиент температуры в твёрдой фазе, увеличивая продолжительность остановок, но самое главное снижать темп нарастания скорости кристаллизации за счёт уменьшения переохлаждения.

Отношение скорости сварки к расстоянию между изотермами (Рис. 1), зафиксированными в микроструктуре осевой части шва, представляет собой собственную частоту кристаллизации, являющуюся основным параметром периодичности  $f_{кр} = \frac{V_{св}}{\Delta x}$ .

Для технически чистых металлов толщиной 3,5 мм, например алюминия марки *АВ000* и титана *ВТ-1.0*, эмпирическая зависимость собственной частоты кристаллизации от скорости сварки  $f_{кр} = \varphi(V_{св})$  представляет собой экспоненту, которая в математическом выражении имеет следующий вид [21]:

$$f_{кр} = 10 + \frac{22,52}{\sqrt{(V_{св} + 0,343)^3}}, \quad (4)$$

где  $V_{св}$  - скорость сварки, см/сек;

10 – постоянный коэффициент, Гц;

22,52 - постоянный коэффициент, см<sup>3/2</sup>сек<sup>-5/2</sup>;

0,343 - постоянный коэффициент, см/сек.

Незначительное содержание примесных элементов в составе чистого металла не позволяет говорить о влиянии концентрационного переохлаждения (КП) в этом случае.

Периодичность процесса кристаллизации зависит от скорости выделения скрытой теплоты плавления и массы металла, находящегося в температурном интервале кристаллизации (ТИК). Соотношение между скоростью выделения скрытого тепла и скоростью его отвода за счёт теплопроводности определяет темп снятия термического переохлаждения, либо увеличивая скорость его снятия или уменьшая.

Процесс выделения скрытого тепла может приводить не только к замедлению затвердевания, но и к остановке с возможным подплавлением затвердевшего шва в чистых металлах, вызывая перемещение межфазной границы в обратном направлении.

Для различных металлов, затвердевающих в одних и тех же условиях, скорость выделения тепла может быть, как меньше скорости охлаждения при температуре плавления, так и больше. Если теплоотвод через твёрдую фазу недостаточен (малые значения коэффициента теплопроводности), то жидкость будет нагреваться. При этом нагрев будет тем сильнее, чем больше слой кристаллизующейся жидкости. В то же самое время охлаждение с большими скоростями может способствовать более медленному выделению скрытого тепла [27].

Для сплавов металлов, например алюминиевого *АМг-6* или сплава системы (*Al + 1,33% Cu*), титанового *ОТ-4*, нержавеющей стали *X18Н10Т*, зависимость  $f_{кр} = \varphi(V_{св})$  имеет более сложный вид (Рис. 10). Форма экспериментально полученных зависимостей

иллюстрирует влияние двух механизмов: периодического выделения скрытого тепла при кристаллизации твёрдой фазы и концентрационной депрессии переохлаждения при накоплении примеси на межфазной границе.

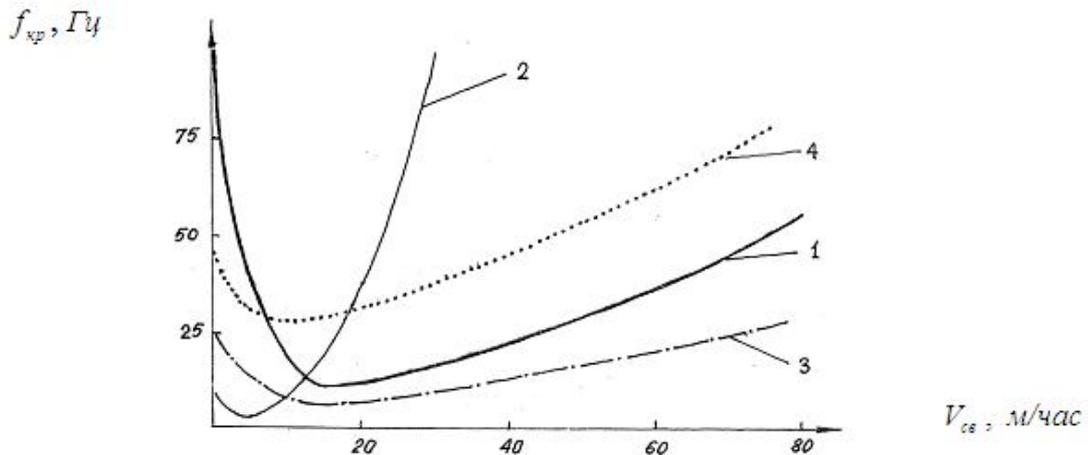


Рис. 10. Зависимость частоты кристаллизации  $f_{кр}$  от скорости сварки  $V_{св}$  для различных материалов толщиной (3,0...3,5) мм:  
 1 – алюминиевый сплав марки АМг-6;  
 2 – титановый сплав ОТ-4.1;  
 3 – нержавеющая сталь Х18Н10Т;  
 4 – малолегированный Cr (хром).

В математическом выражении графики представляет собой сумму экспоненты и параболы (Рис. 10):

$$f_{кр} = f_{ст} + f_{кп}, \quad (5)$$

где  $f_{ст} = \frac{3,79}{\sqrt{(V_{св} + 0,1)^3}}$ , Гц – частота выделения скрытой теплоты кристаллизации для АМг-6;

$f_{кп} = 14,47 \times V_{св}^2$ , Гц – частота образования концентрационной депрессии переохлаждения.

Последнее слагаемое выражения (5), можно представить в другом виде [28]:

$$f_{кп} = \frac{0,5 \cdot k \cdot \lg e \cdot (V_{св})^2}{D_{ж}}, \quad \text{Гц}. \quad (6)$$

где  $D_{ж} = (7,2...15,0) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 / \text{сек}$  – коэффициент диффузии примесного элемента в виде меди (Cu) для твёрдого раствора жидкого алюминия (Al);

$k = 0,01$  – коэффициент распределения примеси в расплаве на межфазной границе (диапазон изменения от 0,01 до 10,0);

$\lg e = 0,43429$ .

Подтверждением высказанной выше гипотезы могут служить экспериментальные результаты работ [15], [25], [26].

Примером воздействия внешнего источника тепла синфазно собственной частоте кристаллизации на межфазной границе является сварка неплавящимся вольфрамовым электродом нержавеющей аустенитной стали Х18Н9Т с подачей присадочной проволоки

(Рис. 10,в,г). При поперечных колебаниях дуги в резонансном режиме в структуре стали исчезла столбчатость (Рис. 10,в), характерная для обычных условий сварки или действия других нерезонансных частот. Границы кристаллитов стали размытыми (Рис. 10,г), исчезла плоскость слабины в осевой части шва с соответствующим повышением пластичности на (25-30)% с  $\delta = 11,5\%$  ( $\psi = 51,1\%$ ) до  $\delta = 38,0\%$  ( $\psi = 56,8\%$ ) и прочности с величины  $\sigma_g = 173,0 \text{ кг/мм}^2$  до значений  $\sigma_g = 187,0 \text{ кг/мм}^2$  [26].

Другим экспериментальным подтверждением является сварка по слою флюса плавящимся электродом алюминия АД-1 толщиной 6 мм с поперечными колебаниями дуги.

Собственная частота кристаллизации для установленной скорости сварки составила величину 50 Гц. Эта частота не согласуется с частотой переноса капель металла электродной проволоки, которая для выбранных условий сварки составила величину порядка 10 Гц и может изменяться в зависимости от эффективного тока. Более высокая частота колебаний дуги ускоряет процесс плавления электрода и приводят к саморегуляции теплопереноса.

После сварки в структуре шва алюминия, представленной на Рис. 10,д,е, отчётливо видно измельчение первичного зерна с 70 мкм до 25 мкм, т.е. более чем в два раза, что способствовало увеличению на 35% предела прочности на растяжение ( $\sigma_p$ ).

Синхронизация периодичности внешнего воздействия и собственной частоты кристаллизации твёрдой фазы повышает устойчивость процесса. В этом случае при резонансе в латентной зоне происходит управляемый сброс энергии на межфазной границе при затвердевании, что представляет собой новый способ управления процессом образования структуры. Периодичность при кристаллизации определяется с помощью температурных изменений. Отсутствие синхронизации частот вызывает подавление колебаний границы раздела фаз (Рис. 4). Напротив - при резонансе происходит существенное увеличение амплитуды температурных колебаний (Рис. 5) с неизменной регулярностью повторения.

Амплитудные отклонения температуры от точки ликвидуса в сторону переохлаждения, создают условия для ускоренного роста твёрдой фазы. Отклонения в противоположном направлении согласуются с моментом выделения тепла кристаллизации.

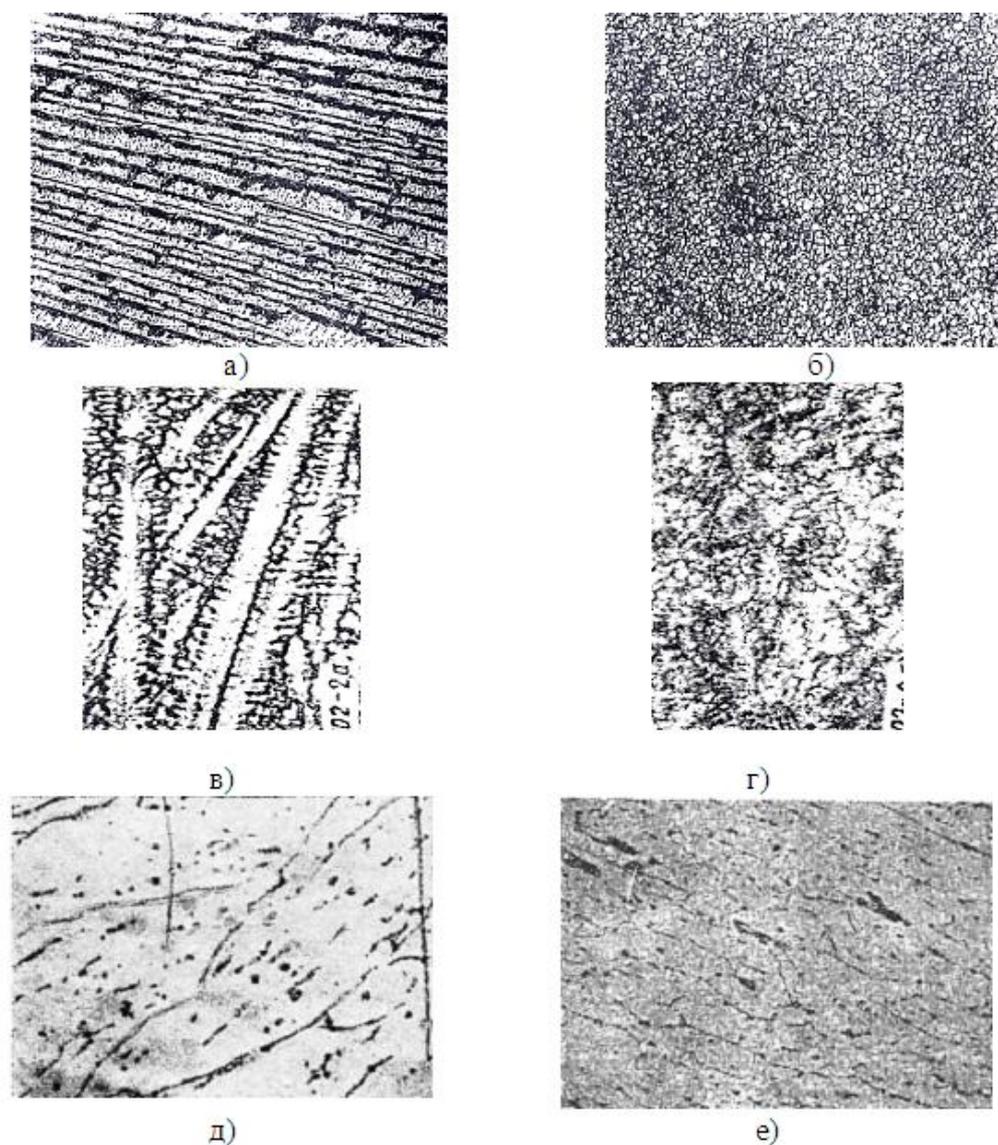


Рис. 10. Микроструктура металла шва после сварки:

а – условия обычной сварки неплавящимся электродом алюминиевого сплава 1925 (параметры режима:  $I_{св} = 90 \text{ A}$ ;  $U_{д} = 26 \text{ В}$ ;  $V_{св} = 12 \text{ м/ч}$ ),  $\times 100$  [15];

б – импульсный подогрев сплава 1925 с частотой  $f = 7 \text{ Гц}$  (параметры режима:  $I_{имп} = 60 \text{ A}$ ,  $t_{имп} = 0,05 \text{ сек}$ ),  $\times 100$  [15];

в – обычные условия сварки плавящимся электродом стали X18H9 без перемещений дуги (параметры режима:  $I_{св} = 150 \text{ A}$ ;  $U_{д} = 12 \text{ В}$ ;  $V_{св} = 12 \text{ м/ч}$ ),  $\times 100$  [26];

г – сварка стали X18H9 с поперечными колебаниями дуги частотой  $f = 3 \text{ Гц}$  и амплитудой 3,5 мм,  $\times 100$  [26];

д – обычные условия сварки плавящимся электродом диаметром 2 мм алюминия марки АД-1 (параметры режима:  $I_{св} = 175 \text{ A}$ ;  $U_{д} = 26 \text{ В}$ ;  $V_{св} = 19,5 \text{ м/ч}$ ),  $\times 200$  [25];

е – сварка алюминия АД-1 с поперечными колебаниями электрода частотой  $f = 50 \text{ Гц}$  и амплитудой 0,5 мм,  $\times 200$  [25].

Примером действия импульсного источника в противофазе к собственной частоте кристаллизации может быть сварка алюминиевого сплава марки 1925 с добавками циркония [15]. В процессе сварки этого сплава перитектической системы производился

импульсный подогрев со стороны затвердевшего металла шва вблизи межфазной границы с собственной частотой затвердевания.

В сварном шве можно наблюдать послойное формирование сплошной мелкозернистой структуры в виде равноосных ячеек на всю глубину пластины (Рис. 10,б). Эта структура существенно отличается от столбчатой вытянутой структуры (Рис. 10,а), характерной для обычных условий сварки.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность эффективного управления структурообразованием при реализации условий резонанса на межфазной границе в процессе кристаллизации металла шва при сварке.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Из многочисленных способов внешнего периодического воздействия можно выделить 2-е группы контактных и бесконтактных способов ввода возмущений в ванну. При этом вторая группа, к которой можно отнести сварку с внешним электромагнитным воздействием, модулированным током или вибросварку, а также сварку с применением лучевых источников нагрева, работающих в нестационарном режиме, является более предпочтительной и наиболее технологичной, поскольку не имеет конструктивных и технологических ограничений, характерных для первой группы способов.

2. Периодическое воздействие внешнего источника тепла на фронт кристаллизации в условиях резонанса, когда происходит синхронизация по частоте и фазе, позволяет достичь существенного увеличения амплитуды температурных колебаний до  $(200...270)^{\circ}\text{C}$  по сравнению с обычными условиями кристаллизации. В периоды понижения температуры ниже точки ликвидуса усиливается термическое переохлаждение, что вызывает ускоренный рост твёрдой фазы. Отклонение в противоположную сторону согласуется с моментом выделения скрытого тепла, которое замедляет продвижение фронта вплоть до полной остановки его и перемещения в обратном направлении.

3. Результатом температурных колебаний являются изменения мгновенных значений скорости охлаждения или нагрева и, как следствие при этом, происходит рост либо замедление скорости кристаллизации на  $\pm 30\%$  по сравнению со средними значениями скорости сварки, которые фиксируются скоростной киносъёмкой.

4. В условиях резонанса существенно усиливаются процессы диффузии легирующих элементов, количественное содержание которых влияет на изменение критерия концентрационного переохлаждения. Существенно повышается теплопроводность и, что особенно важно, теплоотдача при минимальном вложении тепла извне.

5. Управление структурообразованием можно эффективно осуществлять при реализации условий резонанса на межфазной границе в процессе кристаллизации металла шва. Для этого необходимо согласовать частоту внешнего периодического теплового воздействия с собственной частотой кристаллизации металла, соответствующей технологическим условиям сварки и представляющим собой новый способ сварки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: И.А., 1956. 726 с.
2. Чалмерс Б. Теория затвердевания. М.: Металлургия, 1968. 288 с.
3. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. М.: Металлургия, 1975. С.194-202.
4. Рыжов Р.Н. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов. // Автоматическая сварка, 2007. №2. С. 56-58.

5. Тарасов Н.М., Капустин С.С. Применение высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла. // Автоматическая сварка, 1982. №8. С. 10-12.
6. Маруо Х., Хирата Е. Формирование валика сварного шва при импульсной дуговой сварке неплавящимся электродом в инертных газах.// Есэцу гаккай ромбунсю=Quart.J.Jap. Weld. Soc.-1985.-3, №2.-С. 17-24/- Яп. (Перевод ВЦП № М-13733, 1986).
7. Влияние модуляции сварочного тока на структуру и трещиностойкость высоколегированных аустенитных швов. / В.Н. Липодаев, В.В. Снисарь, В.П. Елагин и др. // Автоматическая сварка, 1991. №2. С. 22-26.
8. Славин Г.А. Управление структурой и оптимизация свойств сварных соединений из жаропрочных аустенитных сталей и сплавов на основе никеля : Дисс. ... докт. техн. наук. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1981. 431 с., д.с.п.
9. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т.1. Элементы физики металлов и процесс кристаллизации. М.: Металлургия, 1968. 695 с.
10. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы./ Под ред. Д.С. Чернавского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 240 с.
11. Болдырев А.М. Управление кристаллизацией металла при сварке плавлением: Дисс... докт. тех. наук. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977. 511 с.
12. Черныш В.П., Кузнецов В.Д., Турык Э.В. Изменение температурного состояния сварочной ванны при электромагнитном перемешивании. // Автоматическая сварка, 1976. №7. С. 5-8.
13. Григоращ В.В. Управление кристаллизацией металла шва с целью повышения технологической прочности сварных соединений: Дисс... канд. техн. наук. Воронеж, 1989. 227 с.
14. Азаров И.А. Разработка скоростного процесса сварки модулированным током корневых слоёв шва трубопроводов электродами с основным видом покрытия.: Автореферат дисс. канд. техн. наук. М., 1988. 19 с.
15. Семенюк Н.И. Особенности кристаллизации швов и уменьшения склонности к горячим трещинам при сварке алюминиевых и магниевых сплавов: Дисс... канд. тех. наук. Киев: КПИ, 1991. 238 с.
16. Сущик М.М. Динамика структур в сдвиговых течениях./ В сб.: Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. С. 104-132.
17. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы./ Под ред. Д.С. Чернавского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. (Соврем. пробл. физики). 240 с.
18. Матяш В.И., Пахаренко В.А. Особенности кристаллизации ванны при импульсно-дуговой сварке с электромагнитным воздействием. // Автоматическая сварка, 1983. №9. С. 54-55.
19. Походня И.К., Головки В.В., Шейко П.П. Влияние режимов сварки под флюсом пульсирующей дугой на глубину проплавления основного металла. // Автоматическая сварка, 1996. №5. С. 3-7.
20. Физико-технические особенности лазерной сварки в непрерывном и импульсно-периодическом режимах./ Н.Г. Басов, В.В. Башенко, С.Г. Горный и др. // Сварочное производство, 1985. №8. С. 2-3.
21. 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.
22. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии./ Р.Ф. Ганиев, Н.И. Кобаско, В.В. Кулик и др. Киев: Техника, 1980. 144 с.
23. Явление аномального протекания тепломассообменных процессов в многофазных средах./ Р.Ф. Ганиев, А.А. Долинский, Н.И. Кобаско и др. // ДАН СССР, 1987, Т. 294. №3. С. 560-563.

24. Баштовой В.Г., Вислович А.Н., Кашевский Б.Э. Явление микроконвективного теплопереноса в жидкостях с внутренним вращением.// ПМТФ, 1978.№1. С. 88-93.
25. Алов А.А., Виноградов В.С. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов.//Сварочное производство, 1958. №9. с. 19-22.
26. Макара А.М., Кушниренко А.М.. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений. // Автоматическая сварка, 1967. №1. С. 31-35.
27. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны.// Автоматическая сварка, 1975. №5. С. 7-10.
28. Мовчан Б.А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. К.: ГИТЛ УССР, 1962. 250 с.