ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ
У МАШИНОБУДУВАННІ

DOI 10.15589/jnn20170303
УДК 621.791.037
Л33

CONTROL OF THE WELD STRUCTURE FORMATION UNDER THE INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY MECHANICAL OSCILLATIONS ON THE WELD POOL MELT (REVIEW)

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ ШВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ НА РАСПЛАВ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ (ОБЗОР)

Volodymyr O. Lebediev
office@paton.kiev.ua
ORCID: 0000-0002-0006-3576

Stanislav V. Drahan
dragan.welding@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8634-782X

Serhiy V. Novikov
e-mail: —
ORCID: —

Ivan V. Simutienkov
ivan.simutienkov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2896-2637

В. А. Лебедев,
д-р техн. наук[1]

С. В. Драган,
канд. техн. наук[2]

С. В. Новиков,
инж.[1]

И. В. Симутенков,
канд. техн. наук[2]

[1]***The E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine***
[2]***Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv***
[1]*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев*
[2]*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. Methods of controlling crystallization of the weld pool metal under external mechanical impact have been considered. There is performed an analysis of the factors influencing the process of melt crystallization when low-frequency oscillations are applied. The role of wave acceleration in determining the parameters of the control action is shown. There are presented the relationships between the parameters of low-frequency oscillations and the natural frequency of crystallization of the bath metal, which are necessary for obtaining a fine-grained structure of the weld.

Keywords: structure of metal; melt; mechanical oscillations; parameters; control.

Аннотация. Рассмотрены методы управления кристаллизацией металла сварочной ванны при внешнем механическом воздействии на расплав. Выполнен анализ факторов, влияющих на процесс кристаллизации расплава, при наложении низкочастотных колебаний и показана роль волнового ускорения в определении параметров управляющего воздействия. Приведены необходимые соотношения между параметрами низкочастотных колебаний и собственной частотой кристаллизации металла ванны для получения мелкозернистой структуры шва.

Ключевые слова: структура металла; расплав; механические колебания; параметры; управление.

Анотація. Розглянуті методи керування кристалізацією металу зварювальної ванни при зовнішньому механічному впливі на розплав. Виконаний аналіз факторів, що впливають на процес кристалізації розплаву, при накладанні низькочастотних коливань і показана роль хвильового прискорення у визначенні параметрів керуючого впливу. Наведені потрібні співвідношення між параметрами низькочастотних коливань та власною частотою кристалізації металу ванни для отримання дрібнозернистої структури шва.

Ключові слова: структура металу; розплав; механічні коливання; параметри; керування.

REFERENCES

[1] Alov A. A., Vinogradov V. S. *Vliyaniye vibratsii na protsess dugovoy svarki i svoystva shvov* [Influence of vibration on the arc welding process and the properties of welds]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Manufacture*, 1958, issue 9, pp. 52–55.

[2] Alov A. A., Vinogradov V. S. *Povysheniye kachestva metalla svarnykh shvov* [Improving the weld metal quality]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Manufacture*, 1957, issue 7, pp. 9–10.

[3] Aristov S. V., Russo V. L. *Kristallizatsiya metalla shva pri nizkochastotnykh kolebaniyakh rasplava* [Crystallization of the weld metal at low-frequency oscillations of the melt]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Manufacture*, 1982, issue 11, pp. 42–44.

[4] Boldyrev A. M. *O mekhanizme formirovaniya struktury metalla shva pri vvedenii nizkochastotnykh kolebaniy v svarochnuyu vannu* [On the mechanism of formation of the weld metal structure when low-frequency oscillations are introduced into the weld pool]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Manufacture*, 1976, issue 2, pp. 52–55.

[5] Sutyrin G. V. *Issledovaniye mekhanizma vozdeystviya nizkochastotnoy vibratsii na kristallizatsiyu svarochnoy vanny* [Study of the mechanism of the impact of low-frequency vibration on crystallization of the weld pool]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1975, issue 5, pp. 7–10.

[6] Makara A. M., Kushnirenko B. N. *Poperechnyye peremeshcheniya dugi kak faktor uluchsheniya struktury i svoystv svarnykh soyedineniy* [Transverse arc movements as a factor of improvement of the structure and properties of welded joints]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1967, issue 1, pp. 31–35.

[7] Movchan B. A. *Mikroskopicheskaya neodnorodnost v litykh splavakh* [Microscopic inhomogeneity in cast alloys]. Kyiv, Gostekhizdat USSR Publ., 1962. 340 p.

[8] Morozov V. P. *Vliyaniye kolebatelnogo mekhanizma kristallizatsii na protsess izmelcheniya pervichnoy struktury metalla shva i zony termicheskogo vliyaniya* [Influence of the vibrational mechanism of crystallization on the process of grinding of the primary structure of the weld metal and the zone of thermal impact]. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2010, issue 9. Available at: http://technomag.edu.ru.

[9] Morozov V. P. *Opredeleniye svyazi mezhdu periodichnost'yu protsessa kristallizatsii metalla svarnogo shva, izmeneniyami mgnovennoy skorosti zatverdevaniya i pokazatelyami tekhnologicheskoy prochnosti* [Determination of the relationship between periodicity of the process of crystallization of the weld metal, changes in the instantaneous solidification rate and the indices of technological strength]. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2010, issue 9. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/16101.html.

[10] Morozov V. P. *Analiz usloviy formirovaniya izmelchonnoy struktury pri kristallizatsii metalla svarochnoy vanny s nalozheniyem vneshnikh periodicheskikh vozmushcheniy* [Analysis of the conditions for formation of the crushed structure during crystallization of the metal of the weld pool with application of external periodic disturbances]. *Izvestiya vuzov — Proceedings of universities*, 2006, issue 8, pp. 41–54.

[11] Semenyuk N. I., Rabkin D. M., Lozovskaya A. V. *Kharakter izmeneniya temperatury alyuminiya v protsesse zatverdevaniya pri svarke plavleniyem* [Nature of the change in aluminum temperature during solidification at fusion welding]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1986, issue 9, pp. 22–24.

[12] Yefimov V. A., Eldarkhanov A. S. *Fizicheskiye metody vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splavov* [Physical methods of impact on solidification of alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1995. 272 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Технологическая прочность сварного соединения, как известно, зависит от структуры металла шва, что обусловило создание и развитие различных металлургических и технологических способов по управлению и формированию желаемой структуры, среди которых широкое распространение получил технологический способ с использованием методов внешнего колебательного воздействия на расплав ванны.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Методы ввода колебаний в расплав разделяют на контактные и бесконтактные. К числу первых можно отнести механические колебания сварочного инструмента или сварочной ванны, ко вторым — применение электромагнитного поля, модулированного тока, импульсного подогрева, пульсирующего или колеблющегося лазерного или электронного луча [1, 9, 12]. При этом механические методы считаются менее перспективными вследствие сложностей ввода колебаний в расплав. Кроме того, некоторые исследователи вообще отрицают механическое влияние колебаний низкочастотного диапазона (до 200 Гц) на формирование структуры шва [4]. Указанные обстоятельства обусловливают необходимость проведения дальнейших исследований в изучении формирования структуры шва с применением внешнего механического периодического воздействия на расплав.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — анализ результатов исследований механического периодического воздействия на расплав сварочной ванны и определение ключевых физических и технологических параметров управления процессом формирования структуры шва при использовании низкочастотных колебаний.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассматривая кристаллизацию как колебательный процесс температурного градиента без какого-либо внешнего воздействия, следует отметить определяющее значение скорости выделения скрытого тепла в формировании структуры [9]. Так, во время остановки основная часть выделившегося тепла будет способствовать противоположному движению фронта кристаллизации, что обусловит частичное подплавление уже закристаллизовавшегося металла шва и замедлит процесс кристаллизации. Вообще, различные металлы, кристаллизирующиеся в одинаковых условиях, могут иметь скорость выделения скрытого тепла как больше скорости охлаждения при температуре плавления, так и меньше. В первом случае металл будет нагреваться, причём нагрев будет тем сильнее, чем больше ширина слоя кристаллизующегося металла, во втором случае — более высокая скорость охлаждения будет способствовать замедлению выделения скрытого тепла. Изменяя соотношение между скоростью выделения скрытого тепла и скорости его отвода за счёт теплопроводности, можно либо увеличивать, либо уменьшать скорость снятия термического переохлаждения, тем самым задавая его темп. Таким образом, скорость выделения скрытого тепла формирует скорость кристаллизации, а значит, влияет и на распределение примеси перед межфазной границей, что определяет степень концентрационного переохлаждения.

Особое значение имеет мгновенная скорость кристаллизации, что обусловлено зависимостью формирования первичной структуры металла шва от макроскопического распределения скорости кристаллизации по площади сварочной ванны. В результате экспериментальных исследований была предложена такая формула [10]:

$$V_{св} = A \cdot V_{кр}^2 \cdot \cos\alpha,$$

где $V_{св}$, $V_{кр}$ — средняя скорость сварки и скорость кристаллизации соответственно; $A = 0{,}017$ — эмпирический коэффициент; α — угол между направлением скорости сварки и нормалью в произвольной точке межфазной границы.

Обработка полученных данных, проведенная в той же работе, показала, что увеличение скорости сварки влечёт за собой не только увеличение скорости кристаллизации, но и частоту её пульсаций, причём полный период кристаллизации состоит из трёх временных промежутков: ускоренной кристаллизации, замедления и остановки. Собственно, во время остановки у некоторых металлов и наблюдается обратное движение межфазной границы, что обусловливает процесс подплавления уже закристаллизовавшегося металла шва. Таким образом, ещё одним важным механизмом кристаллизационного процесса является колебание мгновенной скорости кристаллизации, частота которой, наряду с особенностями полученной микроструктуры, определяет периодический характер изменения температуры охлаждения металла шва [11].

Основной параметр управления формированием структуры шва — собственная частота кристаллизации, так как этому значению должна соответствовать частота внешних колебаний, вводимых в расплав сварочной ванны. Следовательно, определение значения этого параметра является исключительно важной задачей при разработке системы управления процессом формирования структуры шва при воздействии внешних колебаний.

В связи с отсутствием строгой теории, описывающей процесс формирования структуры с наложением на расплав внешних механических колебаний, для его изучения применяют различные методы.

Так, в [9] собственная частота кристаллизации определяется как отношение скорости сварки к расстоянию между изотермами, которое фиксируется

в микроструктуре осевой части шва. При этом показано, что частота кристаллизации зависит от химического состава свариваемого металла, толщины свариваемых кромок, параметров процесса, формирующих значение удельной погонной энергии, а также от температуры предварительного подогрева [8].

Вместе с тем, на основе экспериментальных данных установлено, что частота кристаллизации является результатом не только выделения скрытого тепла при кристаллизации твёрдой фазы, но и концентрационной депрессии переохлаждения при накоплении примеси на межфазной границе [9]. Исходя из этого, собственная частота кристаллизации являет собой сумму двух слагаемых: частоты выделения скрытой теплоты кристаллизации $f_{кр\ и}$ частоты образования концентрационной депрессии переохлаждения $f_{кд}$:

$$f_{кр} = \frac{3,79}{\sqrt{(V_{св} + 0,1)^3}} + 14,47V_{св}^2.$$

По данным [7], второе слагаемое может иметь вид

$$f_{кд} = \frac{0,5kV_{св}^2 \lg e}{D_ж}, \qquad (1)$$

где $D_ж$ = (7,2…15,0)·10^{-5} — коэффициент диффузии примесного элемента в жидкой фазе см^2/с, k = (0,01…10,0) — коэффициент распределения примеси в расплаве на межфазной границе.

По мнению автора [4], внешние механические колебания низкой частоты на формирование структуры шва воздействия не оказывают, а первостепенное значение имеют температурные колебания жидкой фазы, периодически меняющие степень концентрационного переохлаждения этой фазы перед фронтом кристаллизации и диффузионные процессы в этой зоне. Иными словами, основным фактором, обусловливающим нарушение теплового баланса на межфазной границе и приводящим к периодичности процесса кристаллизации металла шва, является концентрационное переохлаждение. Следовательно, частота колебаний должна быть согласована со временем накопления примесей перед фронтом кристаллизации, скоростью сварки и составом сплава, что учтено в формуле (1). Расчеты по данной формуле для скорости сварки в диапазоне 18,0…36,0 м/ч подтверждаются опытными данными (рис. 1).

В [4] установлено, что внешнее механическое воздействие вызывает колебания температурного градиента с частотой, зависящей от направления приложения внешних колебаний: при продольных колебаниях расплава эти частоты равны, а при поперечных — частота колебания градиента вдвое больше частоты внешних колебаний. С ростом скорости сварки температурный градиент снижается (рис. 2).

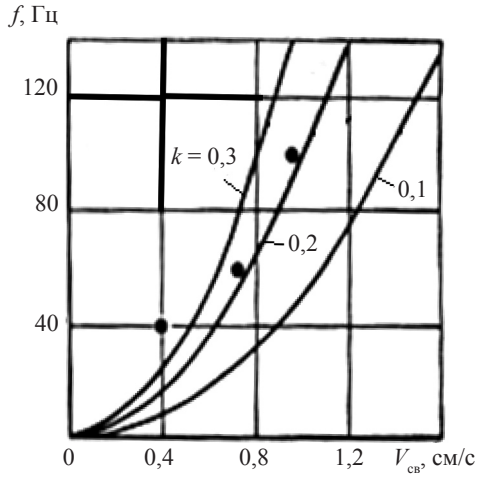


Рис. 1. Расчётные оптимальные частоты температурных колебаний сварочной ванны в зависимости от скорости сварки и коэффициента k распределения примеси в расплаве на межфазной границе (кружки — экспериментальные данные) [7]

Однако в [3] показано, что вывод, сделанный в [4], не верный. Внешние колебания будут по-разному влиять на расплав, а значит, будут иметь место иные механизмы формирования структуры. Согласно данному предположению, диапазон частот можно условно разделить на три части:

1. Частота 1,0…10,0 Гц. В этом случае необходимы значения амплитуды не менее 3,5 мм, для того, чтобы в течение периода расплав мог достичь фронта кристаллизации и вызвать его разрушение и оплавление. При этом образуется большое количество обломков, часть которых выносится в расплав и расплавляется, а другая часть оседает на фронте кристаллизации, обеспечивая формирование мелкозернистой структуры. Данное допущение подтверждено экспериментально в [6], где показано, что мелкозернистая структура была получена при поперечных перемещениях электрода с частотой 3,0 Гц и амплитудой 3,5 мм (рис. 3). В то же время при частоте 8,0 Гц и амплитуде 2,0 мм при таких же колебаниях электрода никаких изменений в микроструктуре валиков не обнаружено.

2. Частота свыше 20,0 Гц. В этом случае, независимо от величины амплитуды на фронте кристаллизации не обнаружено каких-либо температурных колебаний, что, по мнению авторов, объясняет получение мелкозернистой структуры только за счёт механического воздействия волн расплава на межфазную границу и что опровергает результаты [4]. Данное предположение подтверждается экспериментальными данными [1, 2], при которых внешние поперечные колебания сообщались электроду с амплитудой до 0,5 мм и частотой порядка 15,0…30,0 Гц для стали (рис. 4) и 30,0…50,0 Гц для алюминиевого сплава. Такие параметры позволили получить максимальную степень мелкозернистости.

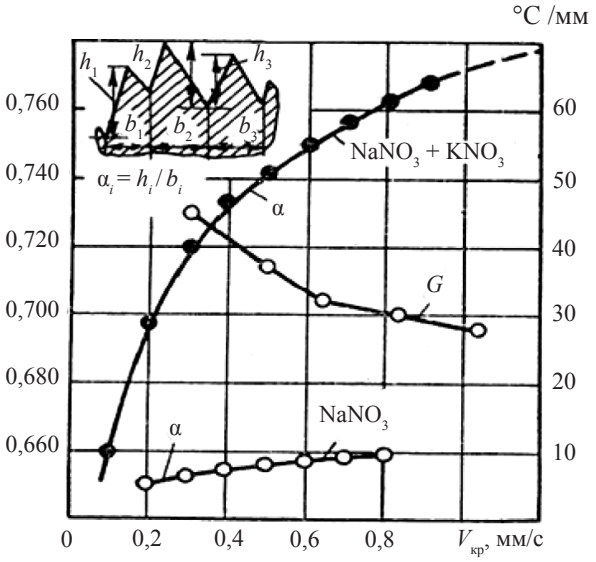
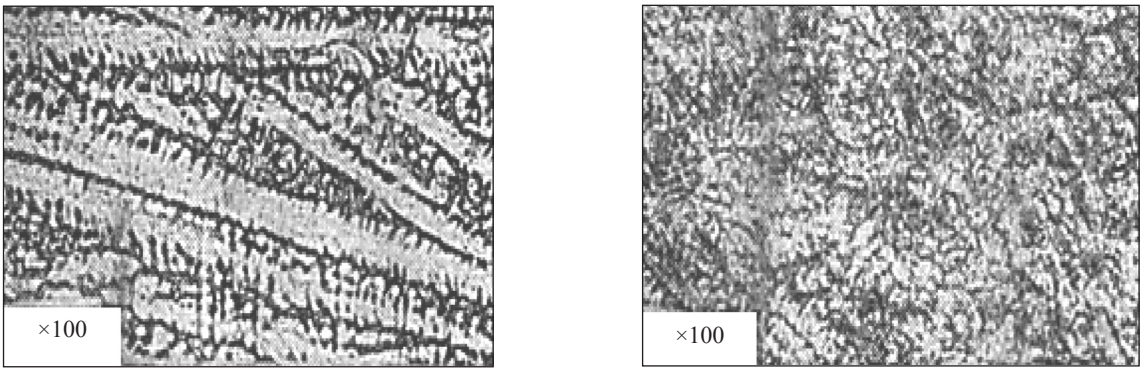
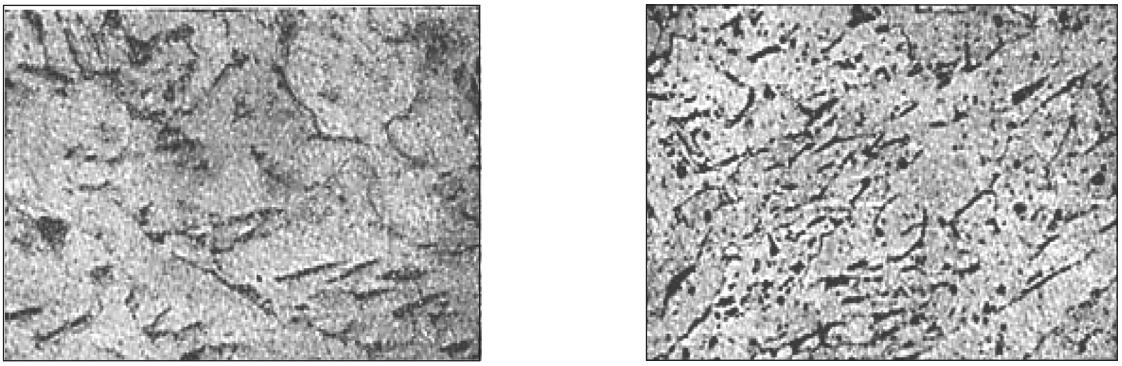


Рис. 2. Влияние скорости сварки на градиент температуры в ванне *G* и шероховатость фронта кристаллизации α



а) *б)*

Рис. 3. Первичная структура металла шва:
а) без перемещений электрода; *б)* с поперечными колебаниями электрода



а) *б)*

Рис. 4. Структура металла шва при сварке малоуглеродистой стали (×200):
а) без вибрации электрода; *б*) с поперечными колебаниями электрода

С другой стороны, авторы [6] попробовали получить мелкозернистую структуру на частотных режимах, приведенных в [1, 2], но им это не удалось. При сварке нержавеющей и низкоуглеродистой стали мелкозернистая структура была получена при частоте внешних колебаний 50,0…60,0 Гц и амплитуде 0,8…1,0 мм [5]. Разница в частотном режиме по сравнению с данными [1, 2, 6] вероятно объясняется тем фактом, что в данном случае внешние колебания прикладывали не к электроду, а в расплав сварочной ванны.

3. Частота 10,0…20,0 Гц. В этом случае характер получения мелкозернистой структуры носит переходной характер, при условии, что значение амплитуды будет не менее 2,0 мм. Вместе с тем, как показано выше [1], наилучшие результаты были достигнуты при частоте внешних колебаний в диапазоне 15,0…30,0 Гц при амплитуде до 0,5 мм. Как видно, эти результаты лишь частично удовлетворяют данному допущению.

На основании изложенного, авторы [3] считают, что амплитуда колебаний является функцией критической скорости движения расплава $V_{кр}$ и частоты собственных колебаний расплава f, что можно выразить формулой

$$A = \frac{V_{кр}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{f} = K \cdot \frac{1}{f}, \qquad (2)$$

Справедливость формулы (2) экспериментально подтверждена для частот колебаний свыше 20,0 Гц. Ниже этого значения данная формула неприменима, так как изменяется характер влияния внешних колебаний на фронт кристаллизации. По мнению авторов [5], наиболее важную роль в формировании структуры металла шва играют гармонические или синусоидальные колебания.

Влияние же концентрационного переохлаждения на расплав по механизму, описанному в [4], возможно только для сплавов, имеющих коэффициент распределения примесей $k < 1$, а также при малых скоростях кристаллизации, обусловливающих наличие равновесия между жидкой и твёрдой фазами на фронте кристаллизации. Однако при сварке такие условия невыполнимы, а концентрация примесей перед фронтом кристаллизации достигает величины, которая не ускоряет, а тормозит процесс.

Важной характеристикой поведения жидкого расплава при воздействии на него внешних колебаний является ускорение. Как показано в [5], в случае неподвижного расплава без влияния дуги, в момент равенства волнового a и гравитационного g ускорений, т. е. $a = g$, расплав будет находиться в состоянии невесомости. Амплитуда колебания при этом будет функцией частоты колебаний ω: $A = q/\omega^2$, а значит, чем выше частота колебаний, тем при меньшей амплитуде будет наступать состояние невесомости.

В таком состоянии на межфазной границе начнутся гидродинамические изменения, обусловленные уменьшением кристаллизационного давления и скорости ликвирующих примесей в междендритном пространстве, а также изменением характера перемещения неметаллических включений и др. В случае $a > g$ в расплаве наступит состояние разрежения, которое будет характеризоваться перемещением ликвирующих элементов и отдельных кристаллов от межфазной границы.

Интенсивность данных процессов будет определяться разностью сил, соответствующих значениям указанных ускорений. Опыты показали, что наложение на неподвижный расплав внешних колебаний амплитудой 1,0 мм с частотой в 25,0 Гц вызывает амплитуду колебаний расплава 1,5…2,5 мм, при частоте 3,8 Гц амплитуда увеличивается на 1,5…3,8 мм. Аналогичная зависимость от частоты наблюдается и при изменении скоростей и ускорений частиц расплава в вертикальном направлении, а в радиальном — движение практически отсутствует.

С уменьшением объёма жидкости амплитуда скоростей и ускорений частиц увеличивается от области дна до поверхности расплава. На основании полученных данных в [5] сделано предположение, что значительное перемещение центров кристаллизации и частей кристаллов, находящихся в зоне фронта кристаллизации, происходит только в вертикальном направлении. Перемещение в радиальном направлении почти отсутствует, что способствует значительному переохлаждению пограничных с фронтом кристаллизации объёмов расплава и зарождения в нём новых центров кристаллизации, что и обусловливает формирование мелкозернистости. Следует отметить, что данные выводы получены при отсутствии явления резонанса. В случае достижения резонанса наблюдалось резкое увеличение вибрационного ускорения, давления среды на частицу и других динамических характеристик колебательной системы. Кроме того, выводы, сделанные в [5], не учитывают влияния на расплав сварочной ванны электромагнитных сил и газовых потоков сварочной дуги, что требует корректировки результатов расчета.

Исследуемый в [5] расплав сварочной ванны рассматривается как несжимаемая жидкость, находящаяся под воздействием гармонических колебаний. Основными параметрами, характеризующими состояние такого объекта, приняты:

1) давление в расплаве $p = p_0 + \rho A \omega^2 x \cdot \sin \omega\tau$, где p_0 — внешнее давление на открытую поверхность металла; x — глубина рассматриваемого слоя в расплаве; ρ – плотность среды; ω – угловая частота.

2) скорость движения среды $v = \omega \cdot \cos \omega\tau$.

Если расплав подвержен воздействию внешнего механического импульса, то при оценке состояния расплава следует учитывать влияние скорости передачи импульса. В этом случае параметры объекта будут такими:

1) величина импульса $I = v\rho$ (v — скорость передачи импульса расплаву; ρ — плотность расплава);

2) давление в расплаве $p = v\rho c_0$ или $p = \sqrt{I\rho c_0}$, где c_0 — скорость звука. При этом градиент давления определяется по формуле $p = \dfrac{2P_{\max}\pi\omega}{c_0}$, где $P_{\max}$ — амплитуда колебания давления.

Авторами [5] установлено также влияние соотношения между частотой внешнего воздействия ω и собственной частотой кристаллизации $\omega_{кр}$ на поведение дисперсной частицы в расплаве. Установлено, что частица величиной $r > 10^{-1}$ мм при $\omega < \omega_{кр}$ будет подниматься вверх, при $\omega > \omega_{кр}$ будет опускаться, несмотря на архимедову силу. На данный процесс существенно влияют вязкость расплава, глубина расположения частицы, взаимодействие продольных и радиальных сил на данной глубине.

Согласно проведенным исследованиям в различных вязких средах в [5] отмечается, что при частоте механических колебаний до 50,0 Гц частицы жидкости не отрываются и покоятся на дне сосуда, а при более высоких частотах начинается придонная кавитация, которая наблюдалась авторами на расстоянии 20…30 мм от дна. Поскольку описанные исследования проводились для большого объема покоящейся жидкости, то использование полученных результатов для объяснения процессов, протекающих в сварочной ванне, не представляется возможным. Тем не менее, в [12] выдвинуто предположение, согласно которому в расплаве металла ванны при наложении низкочастотных колебаний периодически возникают волны давления — адиабатического сжатия и разрежения, изменяющие температуру и плотность жидкого металла. Вследствие этого создаются локальные перегревы и переохлаждения, приводящие, однако, не к кавитации, как утверждается в [5], а к появлению зародышей критических размеров, которые, в свою очередь, увеличивают скорость кристаллизации и структурных превращений. Кроме того, мгновенное изменение температуры способствует росту концентрации дислокаций. Все эти процессы приводят в итоге к измельчению зерна. Как отмечается в [12], результаты экспериментальных работ хорошо согласуются с теоретическими исследованиями. Так, наибольшая степень измельчения с наложением внешних колебаний на сварочную ванну при сварке стали 1Х18Н9 и сплава АЛ-3 (рис. 5) была достигнута при частоте внешних вибраций 50,0…60,0 Гц с амплитудой 0,8…1,0 мм.

В заключение отметим тот факт, что на формирование первичной структуры металла шва при наложении внешних колебаний помимо частотных параметров влияют также и параметры режима сварки. В [6] экспериментально доказано, что при изменении мощности дуги и скорости сварки при неизменных частотных параметрах колебаний сварочной дуги резко изменяется характер кристаллизации металла шва. Таким образом, для получения мелкозернистой структуры при повышении мощности дуги и уменьшении скорости сварки необходимо снижать частоту внешних колебаний, одновременно повышая их амплитуду. Однако при таком режиме трудно получить хорошо сформированный шов, что обусловливает снижение эффективности применения внешних колебаний при сварке металлов больших и средних толщин.

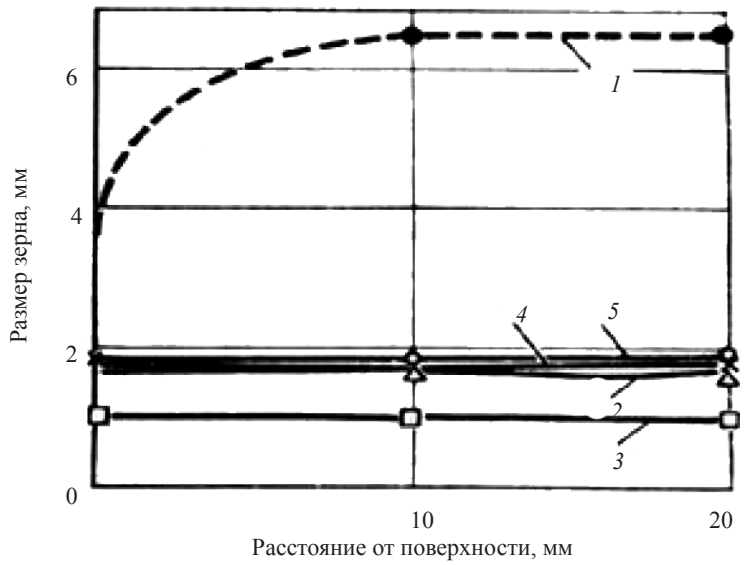


Рис. 5. Влияние вибрации низкой частоты на величину зерна при кристаллизации сплава АЛ-3:
1 — без вибрации; *2–5* — с вибрацией при частоте 40, 60, 80 и 100 Гц соответственно

ВЫВОДЫ. 1. Вследствие отсутствия теории технологической прочности швов, полученных с применением внешних колебаний при сварке, во многих работах формирование первичной структуры авторы рассматривают с позиции или механического, или теплового механизма. В случае сварки с наложением на расплав ванны внешних механических колебаний процесс кристаллизации металла определяется физическими явлениями, присущими обоим взаимосвязанным механизмам.

2. Одним из ключевых параметров управления формированием структуры шва является волновое ускорение внешних колебаний, позволяющее изменять давление в расплаве и скорость перемещения его слоев, обеспечивая тем самым управление фронтом кристаллизации. Изучение влияния волнового ускорения на расплав сварочной ванны требует проведения специальных исследований.

3. Основные параметры внешних колебаний — амплитуда и частота — должны быть согласованы со скоростью сварки. Технологические параметры режима сварки следует повышать при увеличении амплитуды внешних колебаний и одновременно снижать их частоту.

4. Для разработки технических средств управления формированием структуры шва необходимы дальнейшие исследования с целью создания модели, учитывающей как гидродинамические процессы, так и процессы тепломассопереноса в условиях воздействия механических колебаний низкой частоты на расплав сварочной ванны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Алов А. А.** Влияние вибрации на процесс дуговой сварки и свойства швов [Текст] / А. А. Алов, В. С. Виноградов // Сварочное производство. — 1958. — № 9. — С. 52–55.

[2] **Алов А. А.** Повышение качества металла сварных швов [Текст] / А. А. Алов, В. С. Виноградов // Сварочное производство. — 1957. — № 7. — С. 9–10.

[3] **Аристов С. В.** Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава [Текст] / С. В. Аристов, В. Л. Руссо // Сварочное производство. — 1982. — № 11. — С. 42–44.

[4] **Болдырев А. М.** О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну [Текст] / А. М. Болдырев // Сварочное производство. — 1976. — № 2. — С. 52–55.

[5] **Сутырин Г. В.** Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны [Текст] / Г. В. Сутырин // Автоматическая сварка. — 1975. — № 5. — С. 7–10.

[6] **Макара А. М.** Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений [Текст] / А. М. Макара, Б. Н. Кушниренко // Автоматическая сварка. — 1967. — № 1. — С. 31–35.

[7] **Мовчан Б. А.** Микроскопическая неоднородность в литых сплавах [Текст] / Б. А. Мовчан. — К. : Гостехиздат УССР, 1962. — 340 с.

[8] **Морозов В. П.** Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния [Электронный ресурс] / В. П. Морозов // Наука и образование. — 2010. — № 9. — Режим доступа: http://technomag.edu.ru.

[9] **Морозов В. П.** Определение связи между периодичностью процесса кристаллизации металла сварного шва, изменениями мгновенной скорости затвердевания и показателями технологической прочности [Электронный ресурс] / В. П. Морозов // Наука и образование. — 2010. — № 9. — Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/16101.html.

[10] **Морозов В. П.** Анализ условий формирования измельчённой структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений [Текст] / В. П. Морозов // Известия вузов. — 2006. — № 8. — С. 41–54.

[11] **Семенюк Н. И.** Характер изменения температуры алюминия в процессе затвердевания при сварке плавлением [Текст] / Н. И. Семенюк, Д. М. Рабкин, А. В. Лозовская // Автоматическая сварка. — 1986. — № 9. — С. 22–24.

[12] **Ефимов В. А.** Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. — М. : Металлургия, 1995. — 272 с.

© О. В. Лебедєв, С. В. Драган, С. В. Новіков, І. В. Сімутєнков

Надійшла до редколегії 25.05.17
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*