



European Commission  
**TEMPUS**

*The researches of influence of vibrating processing regimes on mechanical and other properties of the welded joints received by fusion welding are carried out on the basis of the literary analysis of the works devoted to influence of vibrating oscillations on melted and crystallizing metal.*

*Р. Г. РИЗВАНОВ, А. М. ФАЙРУШИН,*

*Д. В. КАРЕТНИКОВ, Уфимский государственный нефтяной технический университет*

УДК 621.7.044

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

На сегодняшний день с помощью сварки изготавливается и производится монтаж большей части конструкций, применяемых во всех отраслях промышленности. Это объясняется невозможностью или высокой стоимостью получения конструкций при помощи других технологических процессов. Однако совокупность механических и других свойств сварных соединений редко достигает 80–90% свойств основного металла. Сварное соединение, как правило, является концентратором напряжений, местом расположения различных дефектов и нежелательных структурных изменений. Основной метод по улучшению качества сварных соединений – применение различных видов термической обработки. В качестве общего недостатка данного типа операций можно выделить существенную энерго- и трудоемкость, невозможность использования при сварке труднодоступных узлов и деталей.

Существует также ряд других способов повышения качества сварных соединений [1], однако в большинстве случаев они не находят применение в производстве.

Сравнительно новым методом является вибрационная обработка сварных соединений. По агрегатному состоянию объекта обработки (сварного шва) методы вибрационной обработки можно разделить на два типа: обработка расплавленного и кристаллизующегося металла; обработка затвердевшего металла.

Ряд научных работ по вибрационному воздействию относятся к обработке затвердевшего металла. Если рассматривать вибрационную обработку сварной конструкции, проводимую после кристаллизации сварного шва и его остывания до температуры окружающей среды, то ее основное

назначение – снижение остаточных напряжений и деформаций. Исследования по данному направлению описаны в [2, 3].

Более эффективным и экономически выгодным, по нашему мнению, является метод сопутствующей вибрационной обработки соединений в процессе сварки. В этом случае вибрационное воздействие оказывается не только на затвердевший металл сварного соединения, но и на расплавленный и кристаллизующийся металл сварочной ванны, что не только позволяет получить более широкий спектр положительных эффектов от обработки, но и дает возможность применения локального ввода упругих колебаний непосредственно в зону сварки, что значительно снижает требуемую мощность вибрационных устройств и повышает универсальность метода.

Проведенный литературный обзор источников, посвященных исследованию влияния упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл, показал, что на сегодняшний день не существует общепринятого мнения о механизме сопутствующего вибрационного воздействия, который позволял бы объяснить весь спектр достигаемых эффектов с позиции одной или нескольких взаимосвязанных гипотез.

В связи со сложностью и недостаточной изученностью процесса кристаллизации эффекты от воздействия упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл авторами вышеназванных работ рассматриваются отдельно друг от друга. Но, по нашему мнению, такие особенности сварочной ванны, как сравнительно малый объем расплавленного металла и высокая скорость охлаждения, позволяют получить эффект от воздействия упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл сварочной ванны.

В работах [4–7] доказано, что вибрационные воздействия могут вызывать протекание в расплавленном металле следующих процессов:

- перемешивание жидкой фазы за счет создания разности давлений упругими волнами, что увеличивает теплопроводность жидкой фазы и более равномерно распределяет входящие в состав расплавленного металла включения;
- вывод растворенных в жидкости газовых включений в процессе кавитации, возникающей по причине создания ультразвуковых колебаний от различных элементов конструкции, что снижает вероятность образования пор и активность протекания коррозионных процессов;
- повышение теплоотдачи с твердой поверхности, окружающей расплавленный металл, что несколько увеличивает скорость охлаждения (рис. 1).

В работах [4, 5, 7] установлено, что для крупных отливок эти условия обеспечиваются при частоте вибрации 50–60 Гц с амплитудой 10 мм. Однако для расплавленных объемов меньшего размера, таких, как сварочная ванна, оптимальная частота для обработки в расплавленном состоянии по различным данным находится в диапазоне 50–300 Гц [8, 9].

Многочисленные исследования формирования кристаллических структур показали, что вибрация затвердевающих отливок и слитков сопровождается образованием на границе затвердевания огромного количества обломков ветвей дендритов и возникновением в расплаве множества центров кристаллизации. По существу, технология вибрационной обработки стали и сплавов – это ничто иное,

как введение в расплав дополнительной энергии упругих волн, которая равна [4]:

$$dF_{\text{виб}} = 0,5 \omega^2 A^2 \rho dV, \quad (1)$$

где  $\rho = dm/dV$  – плотность среды;  $m$  – масса частицы в объеме  $dV$ ;  $\omega$ ,  $A$  – частота и амплитуда упругих волн соответственно.

Из приведенной зависимости следует, что повышению вибрационной энергии способствует увеличение частоты и амплитуды вибрации, а также плотности среды.

Величина свободной энергии системы, подвергаемой вибрации, составит [4]:

$$\Delta F = F + F_{\text{виб}} - S(T_1 - T_2) - \sigma\alpha_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – свободная энергия системы;  $F$  – внутренняя энергия системы;  $S$  – энтропия системы;  $T_1$ ,  $T_2$  – температуры жидкого и твердого состояний системы;  $\sigma$  – поверхностная энергия на границе фаз «кристалл-жидкость»;  $\alpha_{\sigma}$  – суммарная площадь поверхностей всех кристаллов (ветвей дендритов и пр.).

Из формулы (2) видно, что с увеличением мощности вводимых упругих колебаний происходит увеличение свободной энергии. Значение вибрационной энергии при формировании кристаллических структур свидетельствует о том, что она расходуется на обламывание ветвей дендритов и создание в системе дополнительных центров кристаллизации. Выделение при этом объемов переохлажденного металла вокруг каждого из них и дальнейший их рост происходит за счет внутренней энергии системы. Здесь также необходимо отметить и то, что значительное увеличение свободной энергии системы может негативно отразиться на свойствах кристаллизующегося металла, привести к различным дефектам.

В работах [4, 7] указывается, что вибрации могут приводить к измельчению кристаллического зерна по двум причинам. Первая – это формирование вибрационных потоков жидкости, что в свою очередь вызывает смывание кристаллических зародышей от фронта кристаллизации и разброс их по всему объему. В этом случае почти одновременно кристаллизуется весь объем, содержащий множество затравочных кристаллов с одновременным выравниванием температуры в объеме жидкости. Вторая – кавитационное разрушение кристаллического фронта при больших энергиях колебаний. Кавитация происходит на газовых пузырьках, которые выделяются на кристаллическом фронте вследствие того, что растворимость в твердой фазе ниже, чем в жидкой. Отброшенные кавитацией в расплав центры кристаллизации становятся за-

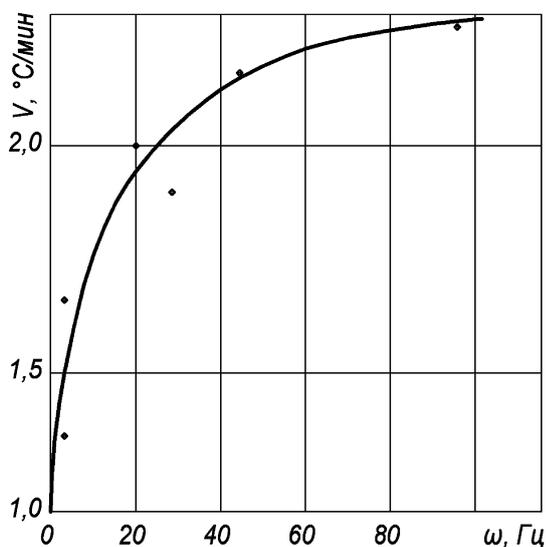


Рис. 1. Зависимость скорости охлаждения расплава от частоты упругих колебаний (для слитка салола и амплитуды 1 мм) [7]

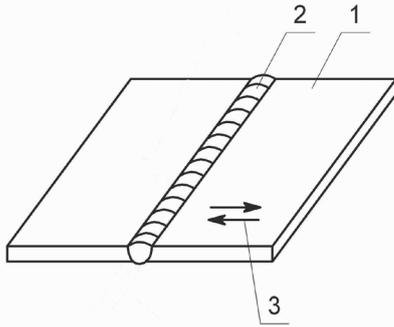


Рис. 2. Схема сварки образцов: 1 – свариваемые пластины; 2 – сварочный шов; 3 – направление упругих колебаний

травками для формирования мелкозернистой структуры. Однако при этом получается рыхлая кристаллическая структура, так как воздушные полости замуровываются твердой фазой, формирующейся на затравках вблизи кристаллического фронта. Таким образом, при малых энергиях колебаний решающим оказывается перемешивание расплава и выравнивание температур [5–7].

Л. П. Капустин [6] считает, что колебания способствуют интенсивному и равномерному переохлаждению расплава по всему объему, в результате чего происходит одновременно объемная кристаллизация. Этот эффект позволяет использовать сопутствующую вибрационную обработку как метод снижения остаточных сварочных напряжений.

Проведенные нами исследования прямым или косвенным образом подтверждают представленные выше гипотезы и факты о влиянии упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл [11, 12]. Для этого нами была проведена серия опытов по оценке влияния параметров сопутствующего вибрационного воздействия на сварной шов в процессе сварки. В качестве материалов для исследования были выбраны наиболее распространенные в нефтегазовом и нефтехимическом машиностроении стали. Схема наложения упругих колебаний и режимы вибрационного воздействия приведена на рис. 2 и в табл. 1.

Таблица 1. Режимы вибрационного воздействия

Номер опыта	Частота вибрации, Гц	Амплитуда, мм	Виброскорость, мм/с
1	0	0	0
2	50	0,8–1	3,1–4,1
3	100	0,8–1	6,2–8,3
4	150	0,8–1	12,5–16,7
5	200	0,8–1	17,1–20,9

Рассмотрим влияние упругих колебаний на расплавленный металл сварочной ванны. Указанный в работах [4–6] эффект по выводу растворен-

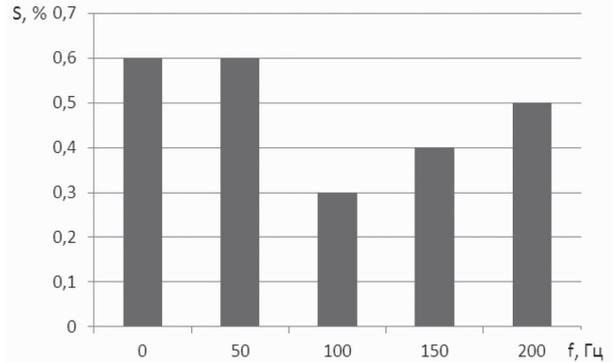


Рис. 3. Диаграмма зависимости площади проекций пор от частоты вибрации

ных в расплавленном металле газовых включений подтверждается данными по определению суммарной площади пор на радиографических снимках в стыковых сварных соединениях пластин из стали 09Г2С, выполненных автоматической сваркой под флюсом с сопутствующей вибрационной обработкой. Анализ радиографических снимков показал, что суммарная площадь проекций пор на участке длиной 50 мм и шириной 10 мм минимальна при частоте сопутствующего вибрационного воздействия 100 Гц (рис. 3). Следовательно, сопутствующая вибрационная обработка оказывает положительное влияние на дисперсность неметаллических включений, их количество и характер расположения в шве.

Увеличение скорости охлаждения кристаллизующегося металла сварного шва при наложении на него энергии упругих колебаний косвенно подтверждается сравнением данных микроструктурного анализа сварных соединений, выполненных с применением вибрационной обработки и без нее, проведенного в работе [12]. Как было показано выше, введение в сварочную ванну упругих колебаний приводит к увеличению свободной энергии системы. При этом происходит снижение минимального размера зародыша при одновременном увеличении числа центров кристаллизации, что в свою очередь приводит к уменьшению среднего размера.

С целью изучения влияния режимов вибрационной обработки при сварке на структуру металла

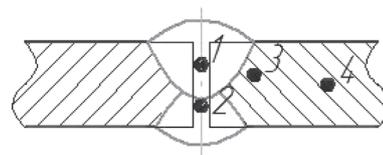


Рис. 4. Схема расположения точек для анализа микроструктуры различных участков сварного соединения: 1 – металл лицевого валика; 2 – металл обратного валика; 3 – участок зоны термического влияния; 4 – участок основного металла

сварного шва и околошовной зоны были проведены металлографические исследования. Визуальный анализ микроструктуры металла сварного соединения проводили с помощью снимков, полученных на оптическом микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-21 с увеличением 300 в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4. Микроструктура металла сварных соединений, полученных при различных режимах вибрации, показана на рис. 5–7.

Из рисунков видно, что наибольшее влияние вибрационные колебания в процессе сварки оказывают на микроструктуру металла лицевого валика и зоны термического влияния. При этом для лицевого валика с увеличением частоты вибрации происходит снижение направленности микроструктуры металла за счет дробления дендритных ветвей, а в зоне термического влияния наблюдается уменьшение средней площади размера зерна.

Описанный в работе [10] эффект по увеличению интенсивности и выравниванию степени переохлаждения расплава по объему при наложении на него вибрационных колебаний особенно актуален для сварочной ванны вследствие малого объема расплавленного металла и высокой скорости его охлаждения. Таким образом, как указывалось выше, вибрационная обработка в процессе сварки способствует одновременной объемной кристаллизации сварного шва, что положительно сказывается на уровне остаточных сварочных напряжений.

Оценку поверхностных микронапряжений проводили в работе [12] методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН. Результаты дифрактометрических расчетов остаточных напряжений в исследуемых образцах из стали 09Г2С приведены на рис. 8.

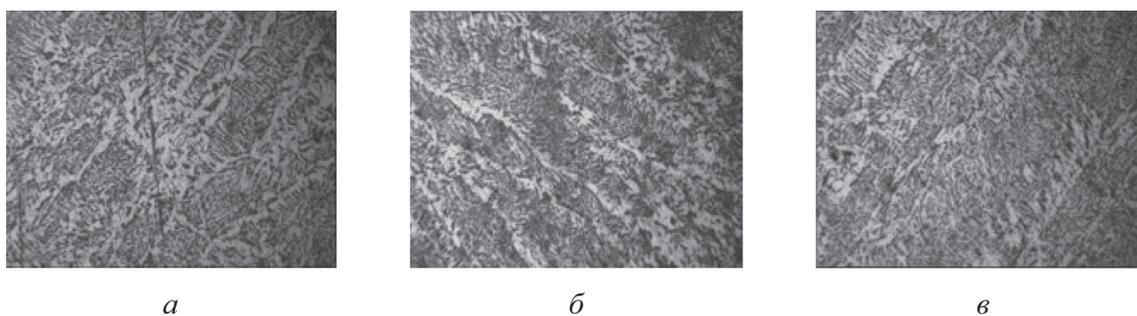


Рис. 5. Микроструктура металла лицевого валика в точке 1 (рис. 4): *а* – без виброобработки; *б* – виброобработка при частоте 50 Гц; *в* – при частоте 150 Гц.  $\times 300$

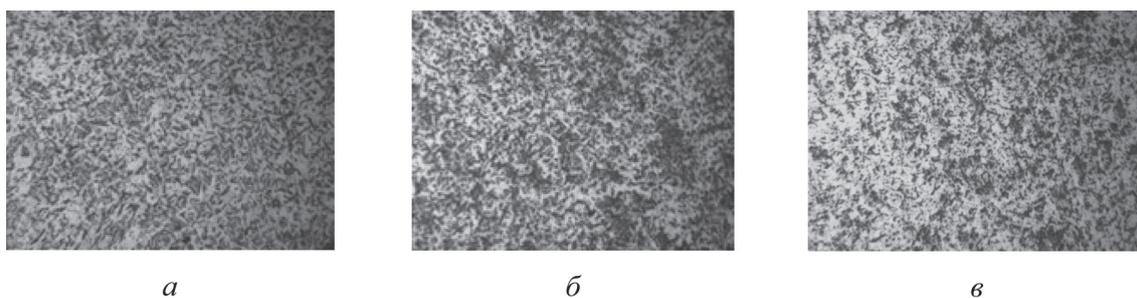


Рис. 6. Микроструктура металла обратного валика в точке 2 (рис. 4): *а* – без виброобработки; *б* – виброобработка при частоте 50 Гц; *в* – при частоте 150 Гц.  $\times 300$

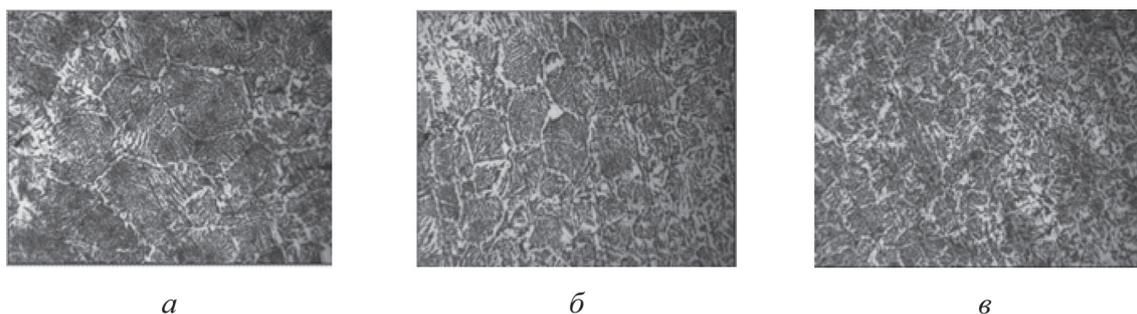


Рис. 7. Микроструктура участка металла зоны термического влияния в точке 3 (рис. 4): *а* – без виброобработки; *б* – виброобработка при частоте 50 Гц; *в* – при частоте 150 Гц.  $\times 300$

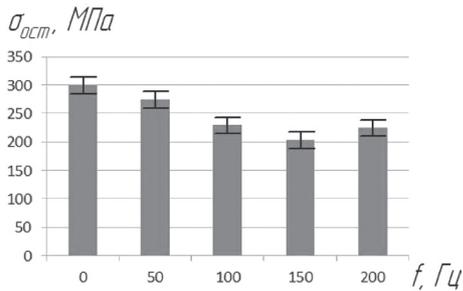


Рис. 8. Результаты определения уровня остаточных напряжений в исследуемых образцах

Из табл. 2 видно, что эффективность снятия остаточных напряжений зависит от режима вибрационной обработки и максимальна при частоте вводимых колебаний 150 Гц при сварке под флюсом.

Указанный выше эффект влияния вибрационной обработки на особенности распределения тепловых полей, описанный в работе [10], позволил предположить о влиянии вибрационных колебаний на глубину проплавления при сварке. Для оценки влияния сопутствующей вибрационной обработки на характер и глубину проплавления при автоматической сварке под флюсом нами была произведена наплавка валиков на пластины из стали 09Г2С на режимах, аналогичных сварке пластин толщиной 10 мм. После этого из пластин были изготовлены макрошлифы для измерения геометрических параметров наплавленного валика в соответствии со схемой, приведенной на рис. 9.

Таблица 2. Результаты измерений и расчета коэффициента формы шва

Частота, Гц	e, мм	h, мм	ψ = e/h
0	16	8	2,00
50	16	9	1,77
100	16	10	1,60
150	16	10,5	1,52
200	16	10,5	1,52

Далее при помощи метода наименьших квадратов нами была получена зависимость глубины проплавления от частоты вибрационного воздействия (рис. 10), которая при аппроксимации полученных экспериментальных точек полиномом третьей степени при среднеквадратичном отклонении  $D = 0,01$  имеет вид

$$h = 7,99 + 0,02f + 2,85 \cdot 10^{-5}f^2 - 3,33 \cdot 10^{-7}f^3. \quad (3)$$

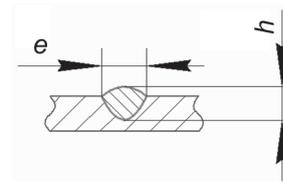


Рис. 9. Схема измерения геометрических параметров наплавленного валика

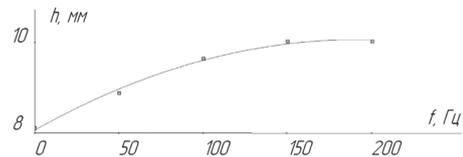


Рис. 10. Зависимость глубины проплавления от частоты сопутствующего вибрационного воздействия

Из рисунка видно, что наложение сопутствующих вибрационных колебаний от 50 до 200 Гц с амплитудой 1 мм на расплавленный и кристаллизующийся металл сварочной ванны позволяет увеличить глубину проплавления, при этом максимальное увеличение глубины проплавления наблюдается при частотах 150–200 Гц. Таким образом, применение сопутствующей вибрационной обработки позволяет снизить вероятность непровара, что особенно актуально при сварке протяженных швов.

Проведенные нами исследования позволяют сделать вывод об эффективности сопутствующей вибрационной обработки сварного шва и прямым или косвенным образом подтвердить гипотезы о механизмах воздействия упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл сварочной ванны.

### Выводы

Установлено положительное влияние вибрационных колебаний в диапазоне частот 50–200 Гц с амплитудой до 1 мм на свойства сварных соединений.

При этом сравнительно небольшой объем расплавленного металла сварочной ванны и высокая скорость охлаждения позволяют получить положительные эффекты, характерные как для обработки расплавленного, так и кристаллизующегося металла.

К отрицательным факторам, появляющимся при чрезмерном превышении энергии упругих колебаний (амплитуда вибрации выше 1 мм), можно отнести возникновение трещин, выплесков, кристаллизацию с различного рода поверхностных дефектов, пористости и др.

### Литература

1. Ба к ш и О. А., З а й н у л л и н Р. С. О снятии сварочных напряжений в сварных соединениях с механической неоднородностью приложением внешней нагрузки // Сварочное производство. 1973. № 7. С. 10–11.
2. Г а в р и л и н И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. Владимир: Владим. гос. ун-т, 2000.
3. Г о л и к о в И. Н., М а с л е н и к о в С. Б. Дендритная ликвация в стали и сплавах. М.: Металлургия, 1977.

4. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995.
5. Зарипов М. З. Модернизация технологии изготовления сварных аппаратов из стали 12Х18Н10Т с применением вибрационной обработки: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2010.
6. Капустин Л. П. // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1950. Т. 14 С. 357–365.
7. Кубенко В. Д., Кузьма В. М., Лунка Г. Н. Динамика сферических тел в жидкости при вибрации. Киев: Наукова думка, 1989.
8. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980.
9. Рагульскис К. М., Ступинас Б. Б., Толутис К. Н. Вибрационное старение. Л.: Машиностроение, 1987.
10. Сагалевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1974.
11. Файрушин А. М. Совершенствование технологического процесса изготовления корпусов аппаратов с применением вибрационной обработки: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2003.
12. Эльдарханов А. С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. М.: СП Интербук, 1996.