УДК 621.643.053:621.791

О.Ф.ХАФИЗОВА, *канд. техн. наук*, *ассистент*, *khafizova@gmail.com*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
А.М.ФАЙРУШИН, *канд. техн. наук*, *доцент*, *tna@mail.ru*
Д.В.КАРЕТНИКОВ, *канд. техн. наук*, *ассистент*, *deniskar@yandex.ru*
Уфимский государственный нефтяной технический университет

O.F.KHAFIZOVA, *PhD in eng. sc.*, *assistant lecturer*, *khafizova@gmail.com*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg
A.M.FAIRUSHIN, *PhD in eng. sc.*, *associate professor*, *tna@mail.ru*
D.V.KARETNIKOV, *PhD in eng. sc.*, *assistant lecturer*, *deniskar@yandex.ru*
Ufa State Petroleum Technological University

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 09Г2С

Показана возможность повышения механических свойств сварных соединений на примере стали 09Г2С путем применения вибрационной обработки соединения в процессе сварки. Приведена методика проведения экспериментальных исследований с описанием схемы наложения колебаний с различными частотами в процессе сварки. Представлены результаты микроструктурного анализа и испытаний образцов на ударный изгиб.

***Ключевые слова*:** сварной шов, вибрационная обработка, механические свойства, микроструктура, термическая обработка.

TECHNOLOGY OPTIONS FOR IMPROVEMENT MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS MADE OF STEEL 09Г2С

The article describes opportunity to improve mechanical properties of welded joints made of steel 09Г2С applying vibration during the welding cycle. The methodology of experimental studies with a description of the oscillation superposition scheme with different frequencies of treatment during welding is carried out. The results of metallographic study and impact strength tests of welded samples are presented.

***Key words*:** weld seam, vibromechanical treatment, mechanical properties, microstructure, thermal treatment.

На сегодняшний день с помощью сварки изготавливается и производится монтаж большей части всех конструкций, применяемых в нефтегазовой отрасли. Это объясняется невозможностью или высокой стоимостью получения этих 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. Основным методом улучшения качества сварных соединений является применение различных типов операций термической обработки. В качестве общего недостатка данного типа операций можно выделить существенную энерго- и трудоемкость

процесса, невозможность применения метода при сварке труднодоступных узлов и деталей.

Существует ряд других способов повышения качества сварных соединений [9], однако в большинстве случаев они не находят применения в производстве по тем или иным причинам.

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.

Большинство научных работ по вибрационному воздействию при сварке исследует обработку затвердевшего металла. Если рассматривать вибрационную обработку сварной конструкции, проводимую после кристаллизации сварного шва и остывания его до температуры окружающей среды, то основное назначение данного типа вибрационной обработки – это снижение остаточных напряжений и упругих деформаций, повышение геометрической стабильности [6].

Вибрационная обработка затвердевших сварных соединений заключается в создании в сварных конструкциях после сварки переменных напряжений определенной величины с помощью механических вибраторов. Виброобработка осуществляется, как правило, на резонансных или близких к резонансным частотах в течение определенного промежутка времени. В ряде случаев виброобработку применяют взамен последующей термической обработки, что оказывается экономичнее примерно в 10 раз, так как она имеет ряд существенных преимуществ:

• необходимое для виброобработки оборудование является универсальным для различных конструкций, компактным и мобильным;

• стоимость этого оборудования, а также затраты на его обслуживание и уход за ним сравнительно невелики;

• процесс снятия сварочных напряжений протекает быстро (максимальное время обработки детали составляет 30 мин.);

• поверхность детали после обработки не претерпевает заметных физико-механических изменений (нет окалины, шлака, цветов побежалости и т.п.).

Более эффективным и экономически выгодным по нашему мнению является метод сопутствующей вибрационной обработки соединений в процессе сварки, при котором вибрационное воздействие воспринимает не только затвердевший металл сварного соединения, но и расплавленный и кристаллизующийся металл сварочной ванны. Это 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 не существует общепринятого мнения о механизме сопутствующего вибрационного воздействия, который позволял бы объяснить весь спектр достигаемых эффектов с позиции одной или нескольких взаимосвязанных гипотез [1, 7, 8].

В связи со сложностью и недостаточной изученностью процесса кристаллизации, эффекты от воздействия упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл 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 как эффекты от воздействия упругих колебаний на расплавленный металл, так и эффекты от воздействия упругих колебаний на кристаллизующийся металл сварочной ванны.

Исследованиями доказано, что вибрационные воздействия могут вызывать в расплавленном металле следующие процессы:

• перемешивание жидкой фазы за счет создания разности давлений упругими волнами, что увеличивает теплопроводность

в жидкой фазе и более равномерно распределяет входящие в состав расплавленного металла включения;

• вывод растворенных в жидкости газовых включений в процессе кавитации, возникающей по причине возникновения ультразвуковых колебаний от различных элементов конструкции, что снижает вероятность образования пор, снижает активность протекания коррозионных процессов;

• повышение теплоотдачи с окружающей расплавленный металл твердой поверхности, что несколько увеличивает скорость охлаждения.

В работе [1] установлено, что для крупных отливок эти условия обеспечиваются при частоте вибрации до 30-60 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 от 50 до 300 Гц [7].

Проведенные авторами исследования прямым или косвенным образом подтверждают представленные выше гипотезы и факты о влиянии упругих колебаний на расплавленный и кристаллизующийся металл.

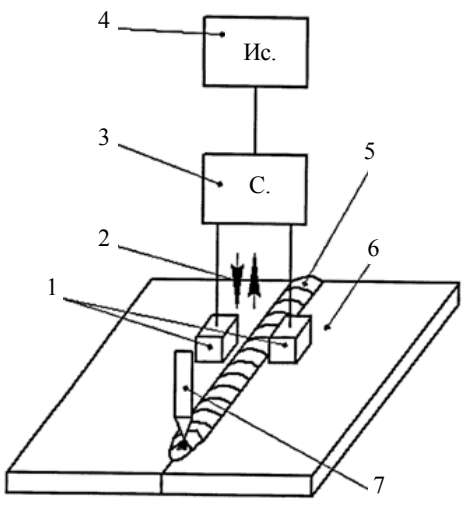


Рис.1. Схема наложения колебаний в процессе сварки

1 – вибрационные устройства; 2 – поперечное направление колебаний в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси сварного шва; 3 – синхронизатор колебаний; 4 – источник энергии колебаний; 5 – сварной шов; 6 – свариваемое изделие; 7 – электрод

Для этого нами была проведена серия опытов по оценке влияния параметров сопутствующего вибрационного воздействия на сварной шов в процессе сварки. В качестве материала для исследования была выбрана наиболее распространенная в нефтегазовой отрасли сталь 09Г2С.

Исследования по влиянию низкочастотной вибрации при сварке на свойства металла сварного соединения, результаты которых представлены в работах [2, 3], позволили выдвинуть гипотезу о положительном влиянии данного метода обработки на хладостойкость сварных соединений из низколегированных сталей. Для изготовления образцов была осуществлена двухсторонняя сварка под флюсом стыковых соединений пластин толщиной 10 мм из стали 09Г2С. Наложение вибрационных колебаний осуществлялось на частотах 50, 100, 150 и 200 Гц с амплитудой 0,8-1 мм, так как в зависимости от типа материала и особенностей конструкции оптимальные режимы обработки могут меняться. Способ наложения колебаний [4] представлен ни рис.1.

Параметры вибрации (амплитуда виброперемещений и частота колебаний свариваемых деталей) фиксировались с помощью виброизмерительного прибора Виботест-МГ4+ , а также виброанализатора Emerson CSI 1900. Сварка – электродуговая автоматическая под слоем флюса. Режимы сварки, сварочные материалы и оборудование принимались в соответствии с рекомендациями нормативных документов.

Анализ влияния режимов сопутствующей вибрационной обработки на размер зерна проводился путем определения средней площади зерна автоматизированным способом в программе SIAMS. Результаты расчета средней площади размера зерна для разных участков сварного соединения в зависимости от режимов обработки представлены на рис.2.

Из графика, представленного на рис.2, видно, что наложение низкочастотных колебаний на расплавленный металл сварочной ванны приводит к снижению средней площади зерна различных участков сварных соединений. Максимальное снижение сред-

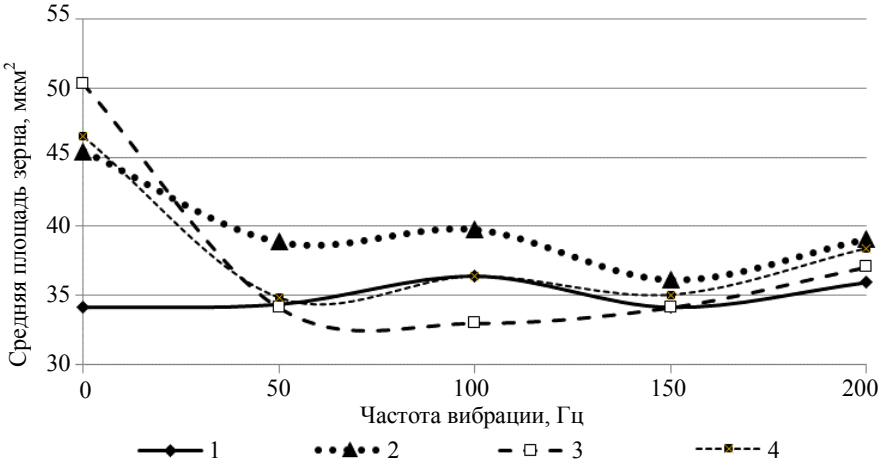


Рис.2. Результаты расчета средней площади размера зерна
1 – основной металл; 2 – сварной шов 1; 3 – зона термического влияния; 4 – сварной шов 2

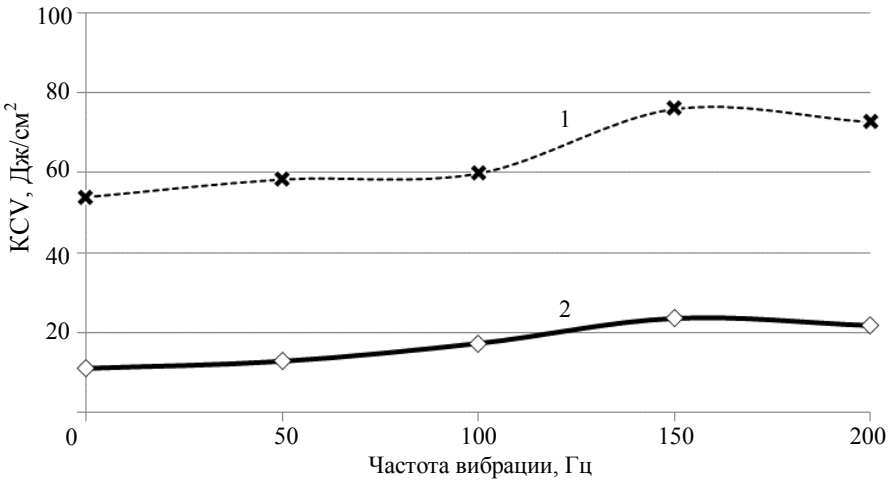


Рис.3. График зависимости уровня ударной вязкости металла сварного шва от частоты вибрационного воздействия при различных температурах испытания (1 – 20 °С; 2 – 40 °С)

ней площади зерна металла зоны термического влияния и сварного шва достигается при частоте сопутствующего вибрационного воздействия 150 Гц и составляет 32 % для зоны термического влияния и 25 % для сварных швов по сравнению с необработанными образцами. Это подтверждает гипотезы, выдвинутые в работах [1, 8], о создании благоприятных условий для формирования мелкозернистой структуры, позволяющих снизить вероятность хрупкого разрушения сварной конструкции.

В низколегированных сталях наиболее слабым участком шва с точки зрения хладноломкости является ось, так как ей соответствует максимальное значение микротвердости металла, что вызвано особенностями тепловых процессов при сварке. Поэтому для определения характера влияния режимов вибрационной обработки на сопротивляемость металла разрушению при ударных нагрузках в присутствии концентратора по ГОСТ 6996 были изготовлены образцы типа IX с концентратором *V*-образной формы в центре сварного шва и подвергнуты испытаниям на ударный изгиб при комнатной (20 °С) и отрицательной температуре (– 40 °С). Результаты испытаний приведены на рис.3.

Из рис.3 видно, что с увеличением частоты сопутствующего вибрационного воздействия происходит увеличение уровня

ударной вязкости металла сварного соединения, при этом максимальное увеличение по сравнению с необработанными образцами достигается при частоте сопутствующего вибрационного воздействия 150 Гц и составляет 24 % для образцов, испытания которых проводились при температуре +20 °С, и 50 % для образцов, испытания которых проводились при температуре –40 °С.

Таким образом, представленные данные и результаты предыдущих работ [2, 3] свидетельствуют об эффективности метода сопутствующего вибрационного воздействия. В результате использования метода появляются возможности повышения механических свойств металла сварного соединения как при положительных, так и при отрицательных температурах.

Отдельного внимания требует рассмотрение вибрационной обработки в процессе сварки на так называемых режимах «с обострением» за счет использования волнового эффекта введения вибрационных колебаний, а именно изменения динамического закона одного из параметров вибрации (частоты, амплитуды), при котором данный параметр стремится в бесконечность за конечный промежуток времени [5]. Данный подход может позволить получить больший эффект от применения вибрационной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ефимов В.А.* Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А.Ефимов, А.С.Эльдарханов. М., 1995. 272 с.

2. Исследование влияния виброобработки в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 09Г2С / А.Л.Карпов, Р.Г.Ризванов, А.М.Файрушин, М.З.Зарипов // Нефтегазовое дело. 2007. № 5. С.183-186.

3. К влиянию вибрационной обработки на механические свойства разнородных сварных соединений / О.Ф.Хафизова, В.И.Болобов, А.Ю.Кузькин, А.М.Файрушин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 1. С.210-219. http://www.ogbus.ru/authors/Khafizova/Khafizova_1.pdf.

4. Патент 2424885 С1 РФ. Способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях металлов / А.М.Файрушин, Д.В.Каретников, М.З.Зарипов и др. Опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21. 8 с.

5. Режимы с обострением. Эволюция идеи: Законы коэволюции сложных структур / Сборник трудов РАН; Под ред. И.М.Макарова. М., 1998. 255 с.

6. *Сагалевич В.М.* Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М., 1974. 248 с.

7. *Сутырин Г.В.* Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. 1983. № 2. С.22-24.

8. *Эльдарханов А.С.* Процессы кристаллизации в поле упругих волн. М., 1996. 256 с.

9. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений / А.Я.Недосека, А.А.Грузд, О.И.Зубченко, С.Б.Ищенко // Автоматическая сварка. 1974. № 3. С.66-69.

REFERENCES

1. *Efimov V.A.*, *Eldarhanov A.S.* Physical methods to influence on processes of alloys solidification. Moscow, 1995. 272 p.

2. *Karpov A.L.*, *Rizvanov R.G.*, *Fairushin A.M.*, *Zaripov M.Z.* Research of influence of vibration treatment during welding on properties of welding joints of petrochemical equipment made of steel 09Г2С / Oil and Gas Business. 2007. N 5. P.183-186.

3. *Khafizova O.F.*, *Bolobov V.I.*, *Kuzkin A.Yu.*, *Fairushin A.M.* Influence of vibration treatment on mechanical properties of dissimilar welding joints / Oil and Gas Business. 2011. N 1. P.210-219. http://www.ogbus.ru/authors/Khafizova/Khafizova_1.pdf

4. Patent 2424885 S1 RF. The method of reduction of residual stresses in welded joints / A.M.Fairushin, D.V.Karetnikov, M.Z.Zaripov et al. Publ. 27.07.2011. Bulletin N 21. 8 p.

5. Regimes with peaking. The evolution of ideas: The Laws of coevolution of complex structures / Proceedings of the Academy of Sciences, ed. academician I. Makarov. Moscow, 1998. 255 p.

6. *Sagalevich V.M.* Methods to remove welded deformations and stresses. Moscow, 1974. 248 p.

7. *Sutyirin G.V.* Reduction of residual stresses of welding joints by low-frequency vibration treatment // Welding Engineering. 1983. N 2. P.22-24.

8. *Eldarhanov A.S.* Crystallization processes in the field of elastic waves. Moscow, 1996. 256 p.

9. *Nedoseka A.Ya.*, *Gruzd A.A.*, *Zubchenko O.I.*, *Ishenko S.B.* Effectivity Effective ways to reduce the residual welding stresses / Atomatic welding. 1974. N 3. P.66-69.