

Компьютерный анализ колебаний подкрепленной ребрами пластины при ее виброобработке в процессе сварки

И.Н. Рыжиков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия
rin111@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6105-0659>

Статья поступила 28.07.2022, принята 05.09.2022

Виброобработка является эффективным методом повышения надежности сварных конструкций. Как показывают исследования многих авторов, фоновая виброобработка в процессе сварки, помимо основного эффекта — снижения остаточных напряжений, позволяет получить еще и целый спектр других положительных эффектов. В силу этого метод фоновой виброобработки можно считать более перспективным по сравнению с виброобработкой после сварки. Однако есть проблема возникновения резонанса при фоновой виброобработке, когда собственная частота колебаний изменяющейся в процессе изготовления конструкции может достигнуть рабочей частоты возбуждающей колебания силы. Резонанс может вызвать большие амплитуды колебаний и выплескивание жидкого металла из сварочной ванны. В этой связи определение собственных частот колебаний конструкции в процессе сварки является актуальной задачей, решение которой позволит определить, на каком этапе изготовления конструкции она может войти в резонанс. Целью данной работы является проведение модального анализа (определения собственных частот и форм колебаний) в программном комплексе Autodesk Inventor квадратной пластины, подкрепленной ребрами жесткости, изменяющейся в процессе сварки, для определения рабочих режимов ее виброобработки. В статье представлены результаты компьютерного моделирования собственных колебаний пластины в процессе последовательной приварки ребер при фоновой вибрационной обработке. Численный анализ колебаний выполнен в программном комплексе Autodesk Inventor. Определены собственные частоты и формы колебаний, непрерывно изменяющиеся в процессе изготовления сварной конструкции. Анализ результатов показал, что при фоновой вибрационной обработке с рабочей частотой возбуждения колебаний 150 Гц колебания свариваемой конструкции могут достигнуть резонансных значений в процессе сварки. На основе анализа результатов компьютерного моделирования разработаны рекомендации, позволяющие избежать вредного влияния резонанса при фоновой вибрационной обработке.

Ключевые слова: сварка; вибрационная обработка; модальный анализ; компьютерное моделирование.

Computer analysis of vibrations of a plate reinforced with ribs during its vibration processing during welding

I.N. Ryzhikov

¹Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
rin111@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6105-0659>

Received 28.07.2022, accepted 05.09.2022

The purpose of the work is to carry out a modal analysis (determination of natural frequencies and vibration modes) of a square plate reinforced with stiffeners, the spectrum of natural vibration frequencies of which changes during welding. The modal analysis is carried out in order to eliminate the possibility of resonance during vibration treatment of the welded structure during welding and to determine the operating modes of this vibration treatment. Computer simulation of structural vibrations was carried out using the Autodesk Inventor software package. The article presents the results of computer simulation of natural vibrations of the plate in the process of successive welding of ribs with background vibration processing. Eigenfrequencies and modes of vibrations continuously changing in the process of manufacturing a welded structure are determined. The analysis of the results show that during background vibration treatment of this structure with an operating oscillation excitation frequency of 150 Hz, its oscillations can reach resonant values at certain stages in the welding process, which is unacceptable, since it can lead to a sharp increase in the amplitude of oscillations and to splashing of liquid metal from weld pool. Based on the analysis of the results of numerical studies of natural frequencies and vibration modes of a welded structure, practical recommendations have been developed to avoid the harmful effects of resonance during background vibration processing. A general technique for low-frequency processing of welded structures is proposed, including the mandatory stages of modeling the structure before its manufacture at different stages of welding and the finished structure after welding, analyzing the simulation results, identifying places of possible resonances, vibration processing during the welding process, and vibration processing of the finished structure after welding.

Keywords: welding, vibration processing, modal analysis, computer modelling.

Введение. Одним из видов обработки сварного соединения с целью улучшения его параметров качества является виброобработка в процессе сварки. При таком способе вибрациям подвергается сварочная ванна с расплавленным кристаллизующимся металлом, в котором происходят следующие процессы:

- вибрации вызывают упругие волны, которые способствуют перемешиванию жидкого металла. При этом увеличивается теплопроводность. Все включения, входящие в состав расплава, более равномерно распределяются по объему сварочной ванны;

- за счет возникающей при вибрации кавитации улучшается вывод из жидкости растворенных в ней газовых включений, что сильно снижает возможность образования пор. Удаление из жидкого металла растворенного газа также повышает коррозионную стойкость, значительно снижая вероятность коррозионных процессов;

- вибрация способствует более высокой теплоотдаче в окружающую среду, что заметно увеличивает скорость охлаждения металла.

Публикации многих авторов [1–10] свидетельствуют о том, что виброобработка в процессе сварки и наплавки позволяет значительно снизить остаточные напряжения и повысить механические свойства материала сварной конструкции. Но опыт промышленного использования виброобработки в процессе сварки пока еще недостаточен для формулирования четких рекомендаций по ее применению в конкретных областях.

Данный метод имеет большие перспективы применения в силу широкого спектра положительных эффектов, среди которых следующие:

- снижаются остаточные напряжения и коробление конструкции;

- снятие сварочных напряжений происходит при изготовлении конструкции, что снижает основное и вспомогательное время;

- при виброобработке деталей на поверхности не образуются шлак и окалина, как после термообработки;

- интенсивное перемешивание сварочной ванны способствует десорбции водорода, что снижает опасность образования холодных трещин

- увеличивается ударная вязкость;

- возрастает предел прочности;

- повышается коррозионная стойкость;

- уменьшается твердость сварного шва;

- снижается пористость;

- увеличивается глубина проплавления и снижается вероятность непровара, что особенно важно при сварке протяженных швов;

- происходит изменение структуры (измельчение зерен металла);

- улучшается геометрическая форма шва;

- положительное влияние на хладостойкость;

- увеличение скорости охлаждения жидкого металла;

- улучшение свариваемости сталей некоторых марок (20ХГСФЛ, 15Х5М и 12Х17).

В силу наличия такого широкого спектра

положительных эффектов данный метод можно считать более перспективным по сравнению с виброобработкой после сварки. Ведь он, наряду с вышеперечисленными эффектами, включает и основной эффект послесварочной обработки — снижение остаточных напряжений. Кроме того, по потреблению энергии метод обработки в процессе сварки является менее затратным, так как здесь не требуется достигать резонансных режимов колебаний конструкции, как в послесварочной обработке, и энергия, требуемая для возбуждения колебаний жидкого металла ограниченного объема сварочной ванны значительно меньше энергии, требуемой для приведения в колебательное движение всей сварной конструкции.

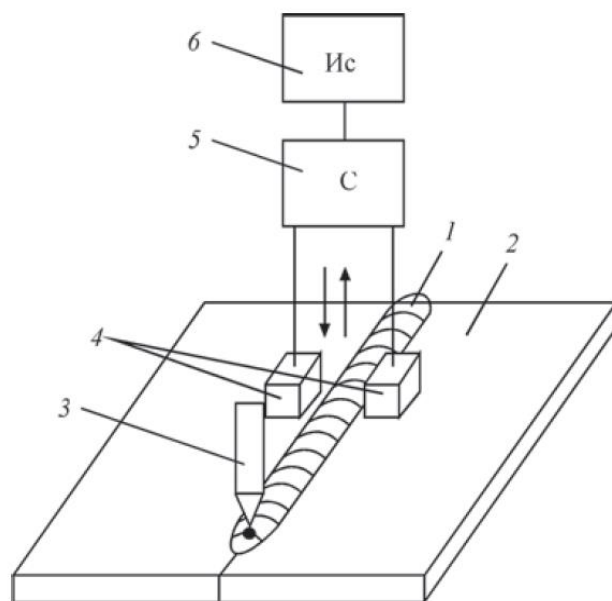


Рис. 1. Схема установки для фоновой виброобработки: 1 — сварной шов; 2 — свариваемые детали; 3 — электрод; 4 — виброинструменты; 5 — синхронизатор; 6 — источник вибрации

Многими авторами [11–20] отмечается важность проведения частотного анализа свариваемой конструкции с целью отстройки от резонансного режима и оценки ее напряженно-деформированного состояния с целью определения зоны ввода колебаний.

С целью определения рабочих параметров для получения максимального эффекта при виброобработке конструкций перед ее выполнением необходимо определить характеристики колебаний данных конструкций (собственные частоты, формы и амплитуды колебаний). Данные характеристики колебаний необходимо знать, чтобы исключить возникновение резонансных колебаний во время проведения сопутствующей виброобработки при сварке. Возникновение резонанса при совпадении собственной частоты конструкции и частоты возбуждающей силы неизбежно приведет к резкому увеличению амплитуды колебаний, а, следовательно, к появлению дефектов сварки (прожогам, разбрызгиванию и пр.). Чтобы этого не произошло,

необходимо точно знать, имеет ли конструкция при заданном закреплении собственную частоту колебаний, совпадающую с частотой возбуждающей силы (150 Гц при сопутствующей сварке виброобработке). Если конструкция имеет такую собственную частоту, то необходимо определить, на каком этапе при сварке она будет совершать колебания с данной частотой, чтобы на данном этапе изменить частоту вибратора либо отключить его на какое-то время, за которое изменятся собственные колебания конструкции и можно будет продолжить процесс сопутствующей виброобработки с рабочей частотой 150 Гц.

Расчет характеристик колебаний можно осуществить экспериментально (что очень затруднительно вследствие больших трудовых и финансовых затрат) либо путем проведения модального анализа конструкции в каком-либо программном комплексе на основе метода конечных элементов.

Целью данной работы является проведение модального анализа (определения собственных частот и форм колебаний) в программном комплексе Autodesk Inventor свариваемой конструкции, изменяющейся в процессе сварки, для определения рабочих режимов ее виброобработки.

Основные положения метода конечных элементов при модальном анализе. Уравнение динамики при собственных колебаниях твердого тела согласно методу конечных элементов в матричной записи имеет вид:

$$M\ddot{\delta} + K\delta = 0, \quad (1)$$

при этом:

$$\delta = \delta_A \cos(\omega t - \beta), \quad (2)$$

где M — матрица масс конструкции; K — матрица жесткости конструкции; $\ddot{\delta}$ — вектор ускорений узлов; δ — вектор перемещений узлов; δ_A — амплитуда колебаний; ω — круговая частота; β — фаза.

В результате преобразований данное уравнение имеет вид:

$$(K - \omega^2 M)\delta_A = 0 \quad (3)$$

Моделирование пластины, усиленной ребрами жесткости. В данной работе в программе Autodesk Inventor был проведен численный модальный анализ сварной пластины, усиленной ребрами жесткости. Цель исследований состояла в определении собственных частот, форм и амплитуд колебаний на каждом этапе изготовления сварной конструкции.

Геометрические параметры пластины 300x300x2 мм, ребра имеют высоту 20 мм, толщину 2 мм (рис. 2).

Материал конструкции — сталь 09Г2С. В программе Autodesk Inventor в модуле твердотельного моделирования была построена модель квадратной пластины.

При первом варианте моделирования присоединение ребер к пластине осуществлялось в последовательности, показанной на рис. 3.

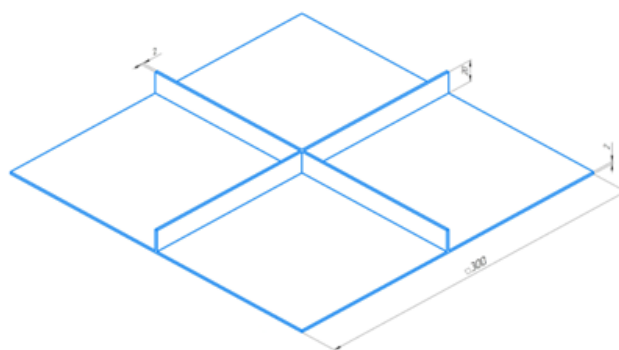


Рис. 2. Сварная пластина, усиленная ребрами жесткости

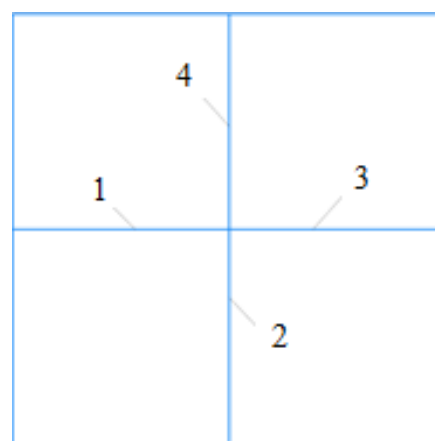
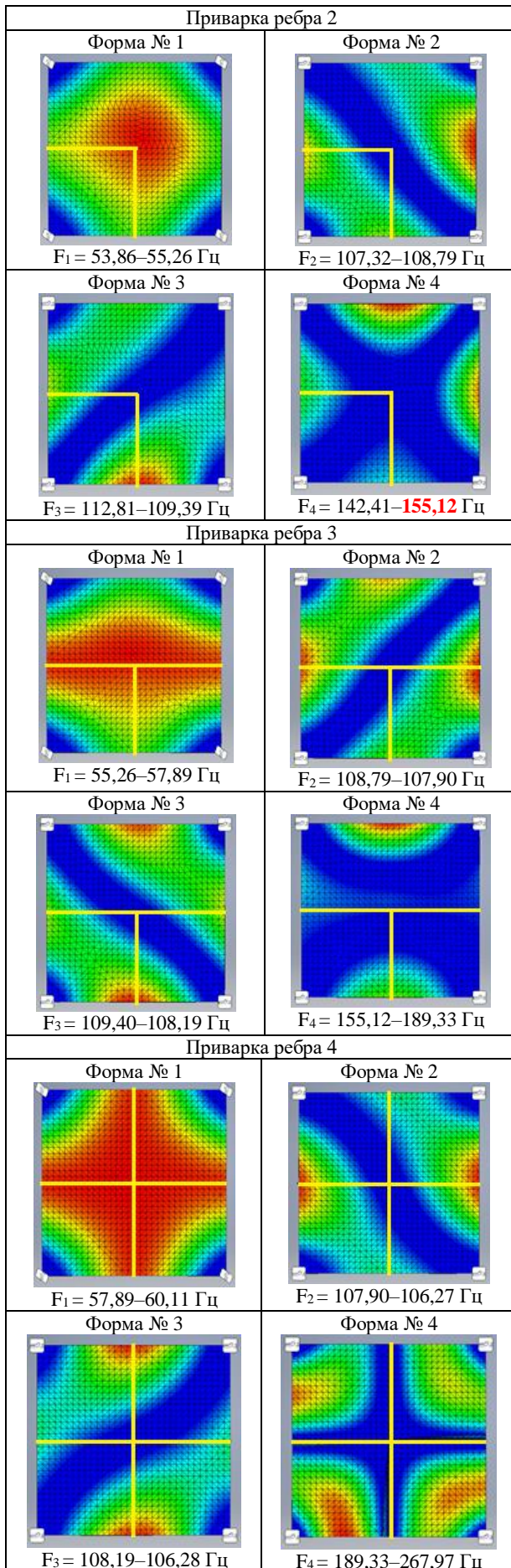


Рис. 3. Последовательность приварки ребер к пластине (вариант 1)

На разных этапах присоединения очередного ребра проводился модальный анализ конструкции. Закрепление во всех случаях было смоделировано в виде жесткой заделки в углах пластины. Формы колебаний пластины и диапазоны изменения собственной частоты колебаний в процессе приварки очередного ребра представлены в таблице.

Таблица. Формы колебаний и диапазон собственных частот при приварке ребер

Приварка ребра 1	
<p>Форма № 1</p> <p>$F_1 = 58,37-53,86$ Гц</p>	<p>Форма № 2</p> <p>$F_2 = 116,63-107,32$ Гц</p>
<p>Форма № 3</p> <p>$F_3 = 119,89-112,81$ Гц</p>	<p>Форма № 4</p> <p>$F_4 = 140,32-142,41$ Гц</p>



Как показали результаты расчетов, в процессе приварки ребра № 2 собственная частота второй формы колебаний конструкции неизбежно достигнет величины 150 Гц. На рис. 3 ориентировочно показана зона возникновения резонансных колебаний при последовательной приварке ребра № 2.

На данном этапе изготовления конструкции недопустимо продолжать виброобработку с рабочей частотой 150 Гц во избежание возникновения резонанса. При сварке в этой зоне необходимо изменить частоту вибратора на 10–15 Гц в сторону уменьшения или увеличения, чтобы не возник резонанс. После выхода сварного шва из данной зоны необходимо продолжать обработку с рабочей частотой 150 Гц. Как показали результаты модального анализа, при дальнейшей приварке ребер 3 и 4 резонансных режимов не возникает.

Понятно, что изменение рабочей частоты при приварке ребра № 2 приведет к снижению эффективности виброобработки на данном участке сварного шва. Данное снижение можно будет компенсировать виброобработкой готовой сварной конструкции, которую можно провести на подходящем резонансном режиме, предварительно рассчитав его путем проведения модального анализа всей конструкции в программном комплексе Autodesk Inventor.

При втором варианте присоединение ребер осуществлялось в другой последовательности, которая показана на рис. 4. В данном случае в начале моделировалась приварка длинного ребра 1, а затем ребер 2 и 3.

Как показали результаты расчетов, в процессе приварки длинного ребра № 1 собственная частота колебаний конструкции неизбежно достигнет величины 150 Гц после прохождения середины пластины. На данном этапе изготовления конструкции недопустимо продолжать виброобработку с рабочей частотой 150 Гц во избежание возникновения резонанса. На рис. 4 ориентировочно показана зона возникновения резонансных колебаний при последовательной приварке длинного ребра № 1.

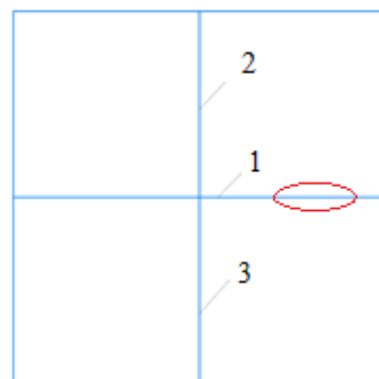


Рис. 4. Последовательность приварки ребер к пластине (вариант 2) и зона возникновения резонанса при приварке ребра 1

С целью предотвращения резонанса при сварке в этой зоне необходимо изменить частоту вибратора на 10–15 Гц в сторону уменьшения или увеличения. После

выхода сварного шва из данной зоны необходимо продолжать обработку с рабочей частотой 150 Гц. Как показали результаты модального анализа, при дальнейшей приварке ребер 2 и 3 резонансных режимов не возникает.

Длинные сварные швы нецелесообразно выполнять по причине возникновения больших сварочных деформаций. Поэтому можно рекомендовать для данной конструкции выполнять приварку длинного ребра № 1 не последовательно, длинным швом по всей длине ребра, а участками: длинным с одного края, затем коротким с другого края (рис. 5). Как видно на рисунке, в зоне возможного резонанса шов отсутствует (зона 1), но с правого края ребра сделан короткий шов (зона 2). Как показали результаты моделирования, при такой приварке ребра № 1 исключается появление резонансной частоты, и нет необходимости изменять рабочую частоту вибратора.

Также были смоделированы собственные колебания готовой пластины с ребрами. На рис. 6 показана первая форма колебаний готовой конструкции, имеющая собственную частоту 60,12 Гц.

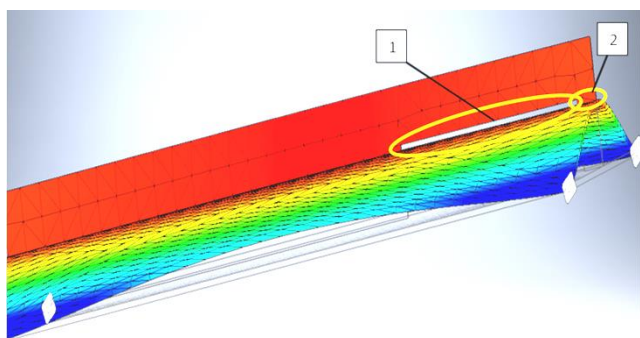


Рис. 5. Приварка ребра 1 прерывистыми участками

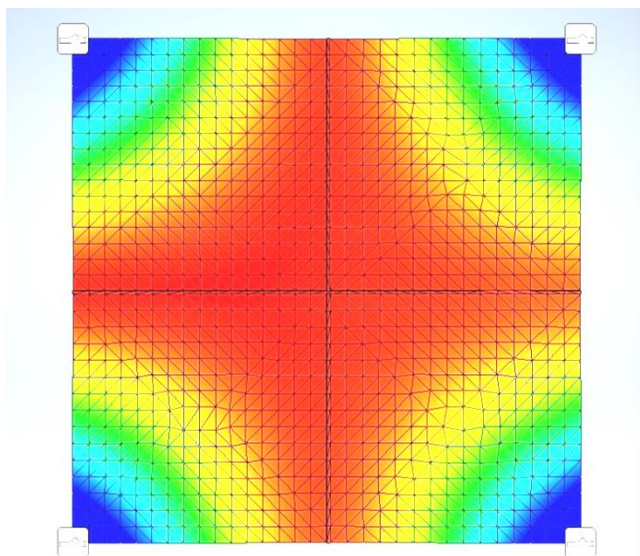


Рис. 6. Первая форма колебаний пластины с ребрами

Рисунок показывает, что при первой форме колебаний достигается максимальная амплитуда колебаний в зоне, в которой находятся все сварные швы конструкции. Это означает, что сварные швы по всей

длине будут испытывать максимальные динамические напряжения, которые, суммируясь с остаточными напряжениями, будут достигать предела текучести, что приведет к устранению остаточных напряжений. Следовательно, данный режим (первая форма колебаний) является наиболее подходящим для виброобработки готовой конструкции после сварки с целью устранения остаточных напряжений.

В результате проведенных исследований выработаны следующие рекомендации при изготовлении подобных конструкций:

- приварку ребер необходимо проводить не длинными сплошными, а прерывистыми швами, последовательно приваривая концы ребер. Подобный порядок выполнения соединения, помимо исключения резонанса, также приводит и к уменьшению сварочных деформаций;

- помимо сопутствующей виброобработки во время сварки для таких конструкций можно рекомендовать проводить после сварки виброобработку готовой конструкции в резонансном режиме, с частотой, соответствующей первой форме собственных колебаний конструкции, которая определяется путем проведения компьютерного моделирования (модального анализа).

Проведенные численные исследования собственных частот и форм колебаний различных конструкций позволили разработать общую методику проведения низкочастотной обработки сварных конструкций, основные этапы которой следующие:

1. Модальный анализ сварной конструкции на разных этапах ее изготовления.

2. Анализ результатов расчета собственных частот колебаний на предмет возможности виброобработки в процессе сварки. Выявление возможного резонансного режима с рабочей частотой 150 Гц и определение границ области, в которой возможен резонанс.

3. Модальный анализ изготовленной сварной конструкции.

4. Анализ результатов расчета частот и форм колебаний изготовленной сварной конструкции на предмет возможности виброобработки после сварки с целью снятия остаточных напряжений. Выявление частот и форм собственных колебаний, при которых сварные швы испытывают максимальные деформации по всей своей длине.

5. Проведение виброобработки в процессе сварки с учетом выявленных в п. 2 областей возможного резонанса. При сварке в данных областях необходимо изменить рабочую частоту виброобработки (150 Гц) на 10–15 Гц в сторону увеличения или уменьшения

6. Проведение виброобработки после сварки с целью снятия остаточных напряжений. Данный этап нецелесообразно проводить в случае, если у конструкции отсутствуют подходящие формы колебаний, упомянутые в п. 4.

Заключение. В данной работе выполнен широкий обзор литературы в области вибрационной обработки сварных конструкций. Анализ результатов исследований других авторов позволяет сделать заключение о том, что оба рассматриваемых вида виброобработки сварных конструкций (виброобработка

в процессе сварки и виброобработка готовых сварных конструкций) являются весьма эффективными методами, позволяющими значительно повысить надежность сварных конструкций. Данные методы имеют несомненные преимущества перед другими известными и широко применяемыми методами.

В работе с целью выбора рабочих параметров обработки, при которых достигается наибольший эффект, проведен модальный анализ свариваемой конструкции в программном комплексе Autodesk Inventor.

В связи со всем вышеизложенным, для конструкций типа «пластина, подкрепленная ребрами жесткости» представляется перспективным применять усовершенствованную методику виброобработки, представляющую собой совмещение двух способов виброобработки — в процессе сварки и послесварочная обработка на разных режимах. Т. е. виброобработка

будет включать два этапа: виброобработка в процессе выполнения сварочной операции и виброобработка готовой сваренной конструкции после кристаллизации металла шва. Таким образом, дополняя виброобработку в процессе сварки послесварочной виброобработкой, можно повысить эффективность снятия остаточных напряжений после сварки при сохранении широкого дополнительного спектра положительных эффектов от сопутствующей виброобработки, проводимой в процессе сварки.

При этом возникает задача подбора конструкции и типа вибраторов, конструирования приспособлений для закрепления свариваемой конструкции, а также проведения необходимого компьютерного моделирования того и другого процессов для правильного выбора режимов виброобработки. Данную задачу планируется решить на следующих этапах исследований.

Литература

1. Parmar R.S. *Welding Engineering and Technology*. KHANNA Publishers, India, 2007.
2. Polakowski N.H., Ripling F.J. *Strength and structure of Engineering Materials*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs N, 1999.
3. Ojo Alaba Sammy, Abere Dare Victor, Oyatogun Grace Modupe, Oluwasegun Kunle Micheal, Adeosun Adebayo Samuel. Influence of Vibration and Heat Treatment on Hardness and Impact Toughness on Low Carbon Steel Butt-welded Joints. // *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2020. 2 (1).
4. Ojo Alaba Sammy, Abere Dare Victor, Oyatogun Grace Modupe, Oluwasegun Kunle Micheal, Adeosun Adebayo Samuel. Impact of Low Frequency Vibration During Welding and Annealing on Microstructure of Mild Steel Butt-Welded Joints, *Modern Approaches on Material Science*, V. 3, iss. 3.
5. Krajewski Arkadiusz. Mechanical vibrations in welding processes, *Welding International*. 2015. 30 (1). P. 1-6.
6. Weite Wu Influence of vibration frequency on solidification of weldments, *Scripta Materialia*. 2000. 42 (7). P. 661-665.
7. Varun Kumar Arulvizhi, Selvakumar A.S., Krishnamoorthy Balachandar A. Waseem Ahmed Correlation between material properties and free vibration characteristics of TIG and laser welded stainless steel 304 reinforced with Al₂O₃ microparticles, *Engineering Science and // Technology an International Journal*. 2021. 24 (4).
8. Ciucka T. Influence of Vibrations During Crystallization on Mechanical Properties and Porosity of EN AC-AISI17 Alloy, *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*. 2013. V. 13, iss. 1. P. 5-8.
9. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В. Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений // *Литье и металлургия*. 2012. № 3. С. 337-342.
10. Латыпов А.А. Совершенствование технологии вибрационной обработки сварных корпусов аппаратов: автореф. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2016. 24 с.
11. Троицкий В.А., Попов В.Ю. Ультразвуковой контроль сварных соединений. Киров: Феникс, 2010. 224 с.
12. Халимов А.Г., Зайнуллин Р.М., Халимов А.А. Техническая диагностика и оценка ресурса нефтегазохимического оборудования. СПб.: Недра, 2012. 568 с.
13. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: МГТУ им. Баумана, 2000. 496 с.
14. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелева К.И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // *Журнал технической физики*. 2000. Т. 70. № 1. С. 52-56.
15. Файрушин А.М., Каретников Д.В., Романчук А.С. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металл сварного шва // *Современные проблемы машиностроения: сб. тр. XI Междунар. науч.-технической конф.* (4-6 дек. 2017 г.). Томск, 2017. С. 50-58.
16. Коробцов А.С., Рогозин Д.В. Критерии качества ультразвукового контроля сварных соединений // *Вестн. Донского гос. технического ун-та*. 2011. № 11 (10). С. 1756-1762.
17. Каретников Д.В., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Колохов К.С. Повышение надежности нефтегазового оборудования, работающего в условиях значительного перепада температур // *Сварочное производство*. 2012. № 6. С. 21-25.
18. Игнатьев И.Э., Концевой Ю.В., Игнатъева Е.В., Долматов А.В., Пастухов Э.А. Условия обеспечения турбулентного перемешивания расплавов при их вибрационной обработке низкочастотными колебаниями тигля // *Расплавы*. 2010. № 5. С. 3-9.
19. Голоднов А.И., Сулицин А.В., Хазан Г.Л. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства меди // *Расплавы*. 2009. № 5. С. 38-44.
20. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995. 272 с.

References

1. Parmar R.S. *Welding Engineering and Technology*. KHANNA Publishers, India, 2007.
2. Polakowski N.H., Ripling F.J. *Strength and structure of Engineering Materials*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs N, 1999.
3. Ojo Alaba Sammy, Abere Dare Victor, Oyatogun Grace Modupe, Oluwasegun Kunle Micheal, Adeosun Adebayo Samuel. Influence of Vibration and Heat Treatment on Hardness and Impact Toughness on Low Carbon Steel Butt-welded Joints // *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2020. 2 (1).
4. Ojo Alaba Sammy, Abere Dare Victor, Oyatogun Grace Modupe, Oluwasegun Kunle Micheal, Adeosun Adebayo Samuel. Impact of Low Frequency Vibration During Welding

- and Annealing on Microstructure of Mild Steel Butt-Welded Joints, *Modern Approaches on Material Science*, V. 3, iss. 3.
5. Krajewski Arkadiusz. Mechanical vibrations in welding processes, *Welding International*. 2015. 30 (1). P. 1-6.
 6. Weite Wu Influence of vibration frequency on solidification of weldments, *Scripta Materialia*. 2000. 42 (7). P. 661-665.
 7. Varun Kumar Arulvizhi, Selvakumar A.S., Krishnamoorthy Balachandar A. Waseem Ahmed Correlation between material properties and free vibration characteristics of TIG and laser welded stainless steel 304 reinforced with Al₂O₃ microparticles, *Engineering Science and // Technology an International Journal*. 2021. 24 (4).
 8. Ciućka T. Influence of Vibrations During Crystallization on Mechanical Properties and Porosity of EN AC-*AlSi17* Alloy, *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*. 2013. V. 13, iss. 1. P. 5-8.
 9. Rizvanov R.G., Fajrushin A.M., Karetnikov D.V. Influence of Vibration Treatment Parameters During Welding on the Properties of Welded Joints // *Foundry production and metallurgy*. 2012. № 3. P. 337-342.
 10. Latypov A.A. Improvement of Technology of Vibration Processing of Welded Bodies of Devices: avtoref. ... kand. tekhn. nauk. Ufa: UGNTU, 2016. 24 p.
 11. Troickij V.A., Popov V.YU. Ultrasonic Inspection of Welded Joints. Kirov: Feniks, 2010. 224 p.
 12. Halimov A.G., Zajnullin R.M., Halimov A.A. Technical Diagnostics and Resource Assessment of Petrochemical Equipment. SPb.: Nedra, 2012. 568 p.
 13. SHCHerbinskij V.G., Aleshin N.P. Ultrasonic Inspection of Welded Joints. M.: MGТУ im. Baumana, 2000. 496 p.
 14. Zuev L.B., Semuhin B.S., Bushmeleva K.I. The Change of ultrasonic Velocity During Plastic Deformation Al // *Technical Physics*. 2000. V. 70. № 1. P. 52-56.
 15. Fajrushin A.M., Karetnikov D.V., Romanchuk A.S. Investigation of the Effect of Vibration Treatment of Steel 09G2S in the Welding Process on the Weld Metal // *Sovremennye problemy mashinostroeniya: sb. tr. XI Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (4-6 dek. 2017 g.)*. Tomsk, 2017. P. 50-58.
 16. Korobcov A.S., Rogozin D.V. Quality Criteria for Ultrasonic Testing of Welded Joints // *Vestnik of Don State Technical University*. 2011. № 11 (10). P. 1756-1762.
 17. Karetnikov D.V., Rizvanov R.G., Fajrushin A.M., Kolohov K.S. Improving the reliability of oil and gas equipment operating in conditions of a significant temperature difference // *Welding International*. 2012. № 6. P. 21-25.
 18. Ignat'ev I.E., Koncevoj YU.V., Ignat'eva E.V., Dolmatov A.V., Pastuhov E.A. Conditions for ensuring turbulent mixing of melts during their vibration treatment by low-frequency oscillations of the crucible // *Raspavy*. 2010. № 5. P. 3-9.
 19. Golodnov A.I., Sulicin A.V., Hazan G.L. Effect of vibration treatment on the structure and properties of copper // *Raspavy*. 2009. № 5. P. 38-44.
 20. Efimov V.A., El'darhanov A.S. Physical Methods of Influence on the Solidification of Alloys. M.: Metallurgiya, 1995. 272 p.