

УДК 534.1:539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА

А.А.Ильенко¹, Ш.А.Тоштиллаев², А.В.Терпугов³, И.Н.Рыжиков⁴

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Представлен обзор работ в области вибрационной обработки сварных конструкций. Приведены результаты компьютерного моделирования собственных колебаний сварных конструкций в пакете прикладных программ Autodesk Inventor. На примере конечноэлементного анализа собственных колебаний сварной конструкции, представляющей собой соединение двух пластин встык, представлена методика выбора режимов вибрационной обработки. Анализ результатов проведенных численных экспериментов (не только частот, но и форм колебаний) позволяет выбрать моды колебаний, частоты которых подходят для низкочастотной виброобработки сварных конструкций.

Ключевые слова: сварные конструкции; вибрационная обработка, остаточные напряжения; модальный анализ.

THE DEFINITION OF MODES OF VIBRATING PROCESSING OF WELDED STRUCTURES USING MODAL ANALYSIS

A.Ilyenko, S.Toshtillayev, A.Terpugov, I.Ryzhikov

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation

The article presents an overview of works in the field of vibratory processing of welded structures. The paper gives the results of computer modeling of natural oscillations of welded constructions in the package of the applied programs of Autodesk Inventor. The article presents a technique for selecting modes of vibration processing using the example of finite element analysis of natural oscillations of a welded structure of two plates in a butt joint. The analysis of the results of numerical experiments (not only frequencies, but also forms of vibrations) allows choosing modes of vibrations, the frequencies of which are suitable for low-frequency vibration treatment of welded structures.

Keywords: welded structures; vibration treatment, residual stresses; modal analysis.

Как показывает производственный опыт, у многих сварных конструкций, изготовленных из простых малоуглеродистых сталей и имеющих непосредственно после сварки достаточно высокую точность размеров, после дальнейшей механической обработки или вылеживания в течение определенного времени наблюдались деформации, и они требовали дополнительной обработки. Причинами таких деформаций являются остаточные напряжения, которые неизбежно присутствуют в конструкции после выполнения соединения.

С целью увеличения стабильности геометрии сварных конструкций и снижения уровня собственных напряжений их подвергают общей термической обработке (отпуску). Термообработка требует больших затрат времени и энергии. Для ее проведения требуется сложное и дорогостоящее оборудование. Кроме того, она не всегда возможна, особенно в случае крупногабаритных конструкций.

В последние десятилетия получил распространение значительно менее энергоемкий способ стабилизации геометрических размеров металлоконструкций и снятия в них остаточных напряжений

¹ Ильенко Антон Алексеевич, магистрант кафедры машиностроительных технологий и материалов,
e-mail: ooostyle.inbox@yandex.ru

Ilyenko Anton, graduate student of Department of mechanical engineering technologies and materials,
e-mail: ooostyle.inbox@yandex.ru

² Тоштиллаев Шохрух Азаматович, магистрант кафедры машиностроительных технологий и материалов,
e-mail: ooostyle.inbox@yandex.ru
Toshtillaev Shokhrukh, graduate student of Department of mechanical engineering technologies and materials,
e-mail: ooostyle.inbox@yandex.ru

³ Терпугов Антон Владимирович, магистрант кафедры машиностроительных технологий и материалов,
e-mail: 906-907@list.ru

Terpugov Anton, graduate student of Department of mechanical engineering technologies and materials,
e-mail: 906-907@list.ru

⁴ Рыжиков Игорь Николаевич, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов,
e-mail: rin111@list.ru

Ryzhikov Igor, associate professor of Department of mechanical engineering technologies and materials,
e-mail: rin111@list.ru

под названием «вибрационная обработка». Сущность способа заключается в создании в металлоконструкции, после сварки или в процессе, переменных напряжений определенной величины с помощью специальных вибровозбудителей (вibrаторов). Переменные напряжения, суммируясь со сварочными, могут достигать по величине предела текучести материала. При этом происходит пластическая деформация, способствующая снижению и перераспределению напряжений первого рода. Одновременно протекают процессы на микроуровне, связанные с генерированием, перемещением и закреплением дислокаций, что в свою очередь приводит к снижению и перераспределению напряжений второго рода и повышению сопротивляемости материала самопроизвольному деформированию. Особенно эффективна виброобработка в низкочастотной области (до 300 Гц). Метод низкочастотной виброобработки позволяет снимать остаточные механические напряжения на резонансных частотах колебаний в нижней области спектра в течение достаточно малого промежутка времени (15–20 мин).

Метод виброобработки является молодым по сравнению с термообработкой. Однако, имеется достаточно много работ на эту тему [1–5].

На рис. 1 представлена наиболее широко применяемая схема виброобработки сварных конструкций. Сварная конструкция 1 установлена на виброизолирующих опорах 2, к ней прикреплен струбцинами или болтами вибровозбудитель 3 с регулируемой частотой колебаний. На пульте управления виброустановки 4 расположены приборы, регистрирующие частоту и амплитуду колебаний с помощью датчика 5, прикрепленного к сварной конструкции. Для виброобработки сварных соединений металлоконструкций применяются механические и электромагнитные вибровозбудители с вынуждающим усилием до $7 \cdot 10^4$ Н в частотном диапазоне до 200 Гц.

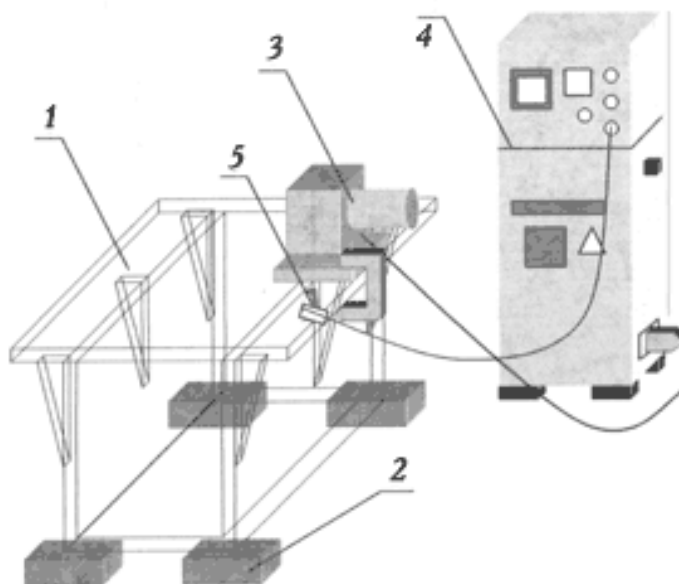


Рис. 1 Схема установки для виброобработки сварных конструкций

Основным условием успешного снятия остаточных напряжений при вибрационной обработке сварных конструкций является создание в зоне сварного шва колебаний с амплитудой и частотой, близкими к резонансному режиму. При этом для большей эффективности процесса необходимо, чтобы амплитуды колебаний точек, лежащих на оси шва, были одинаковыми. Поэтому при выборе режимов виброобработки необходимо располагать информацией о частотах и формах собственных колебаний конструкции. Частоты колебаний обычно определяют, плавно изменяя с помощью регулятора частоту колебаний возбудителя от минимальной до максимальной. При этом регистрируют резонансные частоты конструкции нижней части спектра (до 300 Гц). Виброобработку в дальнейшем производят на выбранных резонансных частотах. Что касается форм колебаний, то их вообще не определяют по причине отсутствия необходимых для этого средств.

В данной работе основные характеристики собственных колебаний – частоты и формы колебаний – предлагается получать с помощью численного моделирования собственных колебаний конструкции – модального анализа в пакете прикладных программ Autodesk Inventor. Конечноэлементному моделированию колебаний конструкций посвящены работы многих авторов [6–12].

В качестве примера рассмотрена конструкция, представляющая собой две стальные пластины, соединенные между собой стыковым сварным швом. Размеры пластин 240×500×12 мм, соединены они между собой встык длинными сторонами. На рис. 2 и 3 представлены общий вид и конечноэлементная модель сварной конструкции. Для решения использовались оболочечные конечные элементы. В качестве свойств материала при анализе использовали свойства стали (модуль упругости – $2 \cdot 10^5$ МПа, плотность – $7,8$ г/см³, коэффициент Пуассона – 0,3). Частотный анализ является линей-

ным, материал считается упругим, не учитывается пластическое течение материала и контактная жесткость.

Были исследованы два варианта закрепления данной конструкции. В первом случае она закреплялась по 2-м углам, принадлежащим короткой стороне, перпендикулярной шву. В угловых узлах сетки были ограничены все перемещения и повороты. Во втором случае те же ограничения были наложены на все узлы, лежащие на торцевой грани, параллельной шву.

В результате расчета в программном комплексе Autodesk Inventor были определены формы и частоты собственных колебаний. Результаты расчета приведены на рис. 4.

Результаты расчета модели с граничными условиями по 1-му варианту показывают, что в низкочастотный диапазон от 0 до 300 Гц для данной пластины попадает только 1-я мода

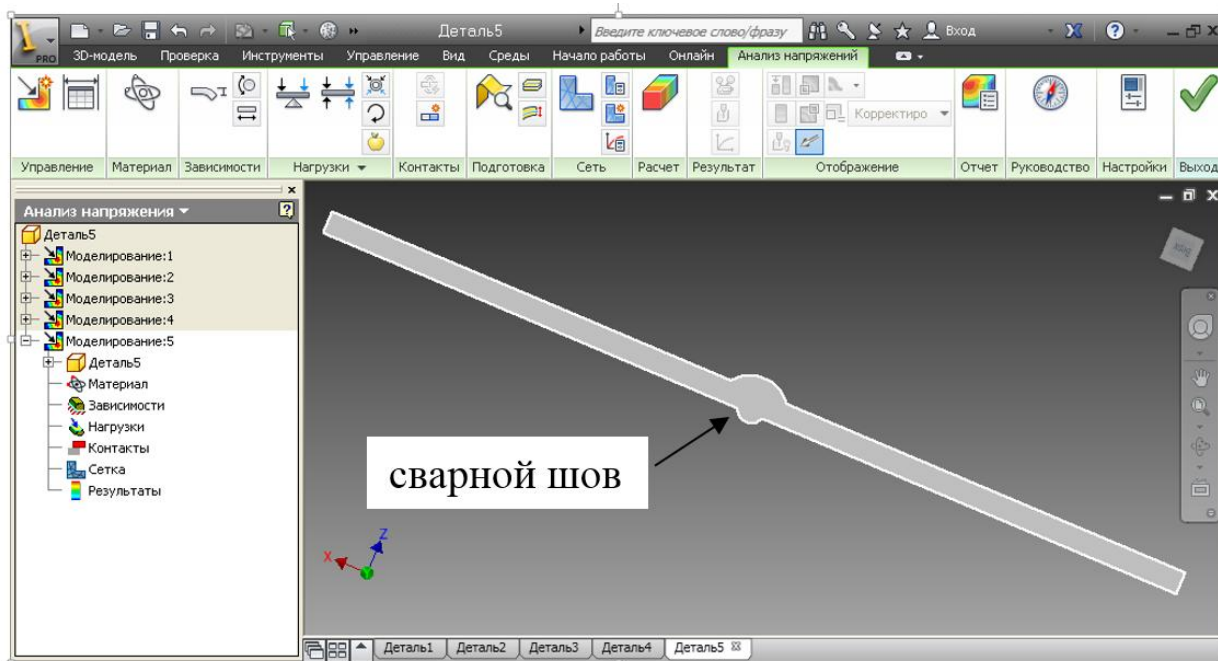


Рис. 2 Общий вид (профиль шва) сварной конструкции из 2-х пластин

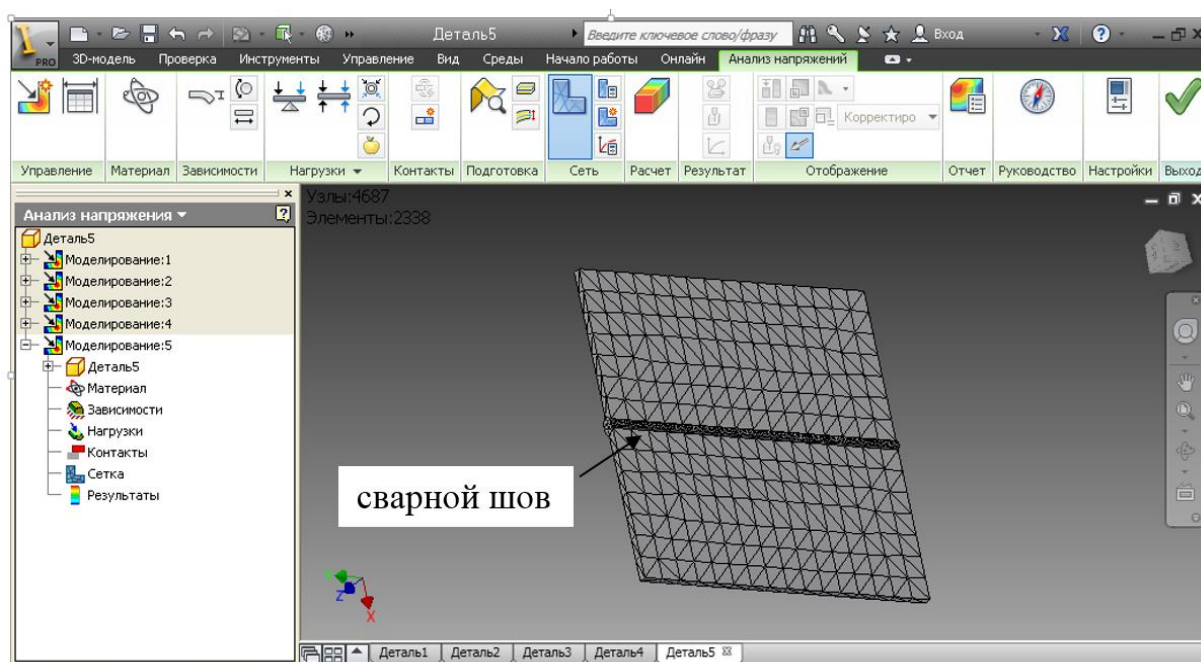


Рис. 3 Конечноэлементная модель сварной конструкции из 2-х пластин

колебаний с частотой 87.44 Гц. Частоты всех остальных мод оказались более 300 Гц. Однако, анализ формы колебаний показывает, что и данная мода неприменима, поскольку разные участки по

длине шва испытывают разные нагрузки при колебании по этой форме. Следовательно, можно предположить, что снятие остаточных напряжений будет происходить неэффективно.

Результаты расчета модели с граничными условиями по 2-му варианту показывают, что для низкочастотной обработки до 300 Гц для данной пластины подходят три первые моды колебаний. Лучше всего подходят моды 1 и 3, т.к. при этих частотах формы колебаний таковы, что шов располагается в зоне действия нагрузки одного знака и приблизительно одной величины.

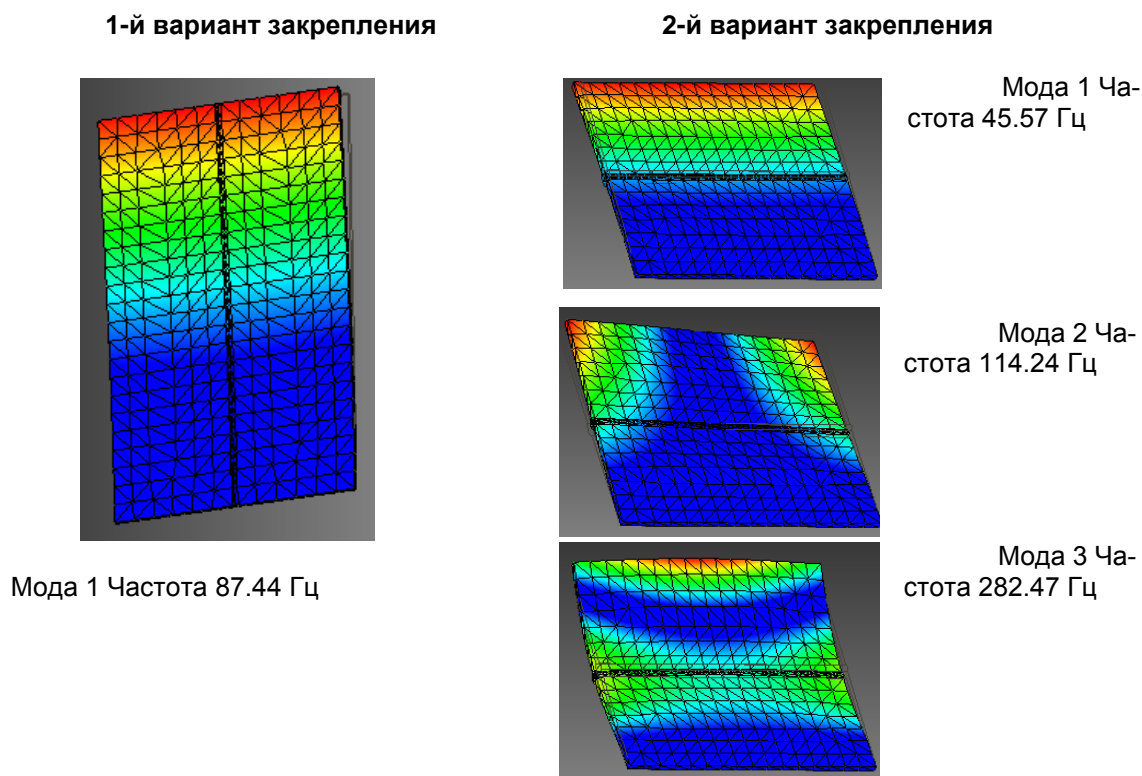


Рис. 4 Результаты модального анализа сварной конструкции

Выводы

На основании анализа обзора исследований других авторов, можно утверждать, что виброобработка является эффективным способом снятия остаточных напряжений и деформаций в сварных конструкциях, обладающим рядом несомненных преимуществ перед другими способами, в частности, термообработкой (простота, дешевизна, универсальность). Однако, эффективность процесса снятия остаточных напряжений при виброобработке существенно зависит от выбранного режима обработки, характеризующегося условиями закрепления конструкции и частотой колебаний, возбуждаемых вибратором. Выбрать требуемые параметры, обеспечивающие высокую эффективность виброобработки, можно с помощью модального анализа в конечноэлементных пакетах прикладных программ, проведя анализ собственных частот и форм колебаний сварной конструкции. Данный анализ рекомендуется проводить еще на этапе автоматизированного проектирования таких конструкций в CAD/CAE-системах, чтобы уже на этапе проектирования выбрать необходимый режим виброобработки таких конструкций при последующем их изготовлении.

Библиографический список:

1. Лащенко Г.И. Виброобработка сварных машиностроительных конструкций // Сварочное производство. 1992. № 12. С. 3–4.
2. Лащенко Г.К., Демченко Ю.В. Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металло-конструкций. Киев: Экотехнология, 2008. 168 с.
3. Петров А.Ф. Вибрационная обработка для снятия напряжений // Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 1. 45 с.
4. Сагалевич В.М., Мезенцева С.А., Насыров Г.Х. Исследование снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях балочного типа вибрационной обработкой // Сварочное производство. 1995. № 7. С. 15–18.
5. Шухостанов В.К., Галяш А.А., Ильичев А.А. Виброобработка крупногабаритных сварных конструкций из титановых сплавов // Автоматическая сварка. 1993. № 2. С. 39–42.
6. Рыжиков И.Н., Репецкий О.В., Нгуен Тьен Куэт. Один из подходов к оценке долговечности

рабочих колес турбомашин // Вестник ИргТУ. 2015. № 5 (100). С. 22–27.

7. Рыжиков И.Н. Экспериментальные исследования расстройки параметров моделей рабочих колес газотурбинных двигателей // Вестник ИргТУ. 2014. № 12 (95). С. 53–57.

8. Рыжиков И.Н. Оценка и возможные способы увеличения долговечности элементов роторов ГТД // Вестник ИргТУ. 2007. № 1 (29). С. 155–158.

9. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н. Анализ тепловых полей и термонапряженного состояния деталей турбин // Вестник стипендиатов ДААД. 2001. № 1. С. 89.

10. Нгуен Т.К., Репецкий О.В., Рыжиков И.Н. Прогнозирование уровней напряжений в лопатках рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров // Вестник ИргСХА. 2017. № 78. С. 142–151.

11. Рыжиков И.Н., Репецкий О.В., Нгуен Т.К. Динамика элементов роторов турбомашин на переходных режимах работы с учетом нелинейных эффектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11 (118). С. 61–68.

12. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen T.Q. Dynamics of gas turbine engines rotors taking into account non-linear effects. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2016. Vol. 8.P. 361–365.