



Жидков А. Б.

Восточноукраинский
национальный
университет имени
Владимира Даля

УДК 621.789: 621.791.01

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ ВИБРООБРАБОТКЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Наведено основні підходи до здійснення керованої віброобробки зварних конструкцій. Запропоновано технологічні прийоми та параметри віброобробки, які дозволяють керувати процесом зниження залишкових напруг у зварних та подібних конструкціях

The basic approaches to implementing a managed vibrotreatment welded structures. Proposed technological methods and treatment options that allow you to manage the process of reducing the stress in the weld and similar structures.

Качество сварных конструкций является комплексным показателем, определяемым совокупностью определенных частных характеристик, набор и значения которых зависят от условий эксплуатации. Для большинства конструкций значимым показателем является их размерная стабильность и уровень остаточных напряжений. Известно, что сварка плавлением создает в конструкциях поле остаточных упругих напряжений, которые распределены в них крайне неравномерно и имеют пиковые значения $0,5 \div 1,7\sigma_{0,2}$, в зависимости от свариваемого материала. В процессе вылеживания или эксплуатации конструкций происходит релаксация напряжений, сопровождающаяся пластической деформацией формоизменения. В результате конструкция изменяет свою форму и может выйти из поля допусков. Кроме того, высокий уровень остаточных напряжений в сочетании с эксплуатационными нагрузками, структурными изменениями в зоне термического влияния и дефектами в виде пор и включений в сварном шве является хорошим фоном для возникновения трещин, особенно при циклическом нагружении.

Наиболее распространенным методом размерной стабилизации и снижения уровня остаточных напряжений является термообработка. Однако ее применение для габаритных конструкций, конструкций из активных металлов, а также на монтаже затруднено. Кроме того, термообработка является высокоэнергоемким методом и в некоторых случаях снижает механические свойства основного материала. Поэтому

постоянно ведутся работы по замене термообработки другими, более универсальными и менее энергоемкими методами. Одним из таких методов является вибростабилизация, или вибрационная обработка. Основное ее преимущество – низкая энергоемкость, которая позволяет сократить расходы на обработку конструкции в несколько раз. Например, использование ее для обработки рам тележек дизель-поездов на ХК «Лугансктепловоз» позволяет снизить затраты с 6115 грн. до 8,1 грн. на одну тележку. Кроме того, для низкочастотной виброобработки используется достаточно простое, универсальное и мобильное оборудование, позволяющее осуществлять ее в цехах и на монтаже.

Сущность низкочастотной виброобработки состоит в вибрировании сварной конструкции на частотах 10 – 200 Гц в течении некоторого времени. В процессе вибрирования в конструкции возникают вибрационные напряжения, которые, суммируясь с остаточными, ускоряют и интенсифицируют процесс релаксации последних [1, 2].

Следует отметить, что существуют значительные разночтения в области определения результатов виброобработки и ее влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) сварной конструкции. Одни авторы отмечают снижение напряжений первого рода на величину порядка 40 % от начальных [1 - 3], другие отмечают изменение только напряжений второго рода [4], а третьи не фиксируют никаких существенных изменений НДС [5, 6]. Все измерения обычно проводятся локально, в отдельных точках, и



сложилось ошибочное мнение о том, что виброобработка некоторым образом равномерно снижает уровень остаточных напряжений в конструкции в целом. Однако для большинства конструкций уровень остаточных напряжений важен только для отдельных узлов, и обработка всей конструкции целиком нецелесообразна. Учитывая, что существует эффективный радиус воздействия вибратора R_E [7], и то, что виброобработка приводит к потере части ресурса в силу накопления усталостных микрповреждений [8, 9], актуальной является управляемая виброобработка, направленная на снижение напряжений только в определенных зонах сварной конструкции или сглаживании пиковых значений, что способствует повышению размерной стабильности.

С учетом вышеизложенного целью данной работы является формулирование основных принципов и подходов к управляемой виброобработке и определение основных параметров виброобработки, которые позволят осуществлять ее направленно и управляемо.

Вибрационная обработка может проводиться по нескольким схемам:

- обработка единичного изделия;
- обработка группы изделий, скрепленных жестко или через демпфирующие прокладки между собой;
- обработка одного или группы изделий, закрепленных на вибростоле.

Независимо от схемы обработки для достижения требуемого распределения вибрационных напряжений в обрабатываемой конструкции или отдельной ее части необходимо установить и поддерживать четко определенные параметры колебательного процесса - параметры виброобработки.

Основными параметрами виброобработки являются:

- частота обработки;
- величина вибрационного усилия;
- длительность обработки;
- схема и количество опор;
- жесткость опор;
- количество вибраторов и место их установки;
- наличие и расположение дополнительных масс.

Обрабатываемые конструкции условно можно разделить на несколько типов:

- балочные конструкции с одноосным распределением напряжений;
- плоские или объемные рамные конструкции с одноосным распределением напряжений в стержнях

и двух- трехосным распределением в узлах;

- плоские тонколистовые конструкции с двухосным распределением напряжений;
- объемные конструкции из толстого металла, а также литосварные и др. конструкции с ярко выраженным трехосным распределением напряжений;
- конструкции, содержащие отдельные элементы каждого из приведенных ранее типов.

Очевидно, что режимы обработки каждого из приведенных выше типов конструкций будут различны, однако принципы управляемой виброобработки будут сходными. Основная задача управляемой виброобработки – это создание требуемого уровня вибрационных напряжений в наиболее нагруженных при эксплуатации зонах и зонах с максимальными пиковыми напряжениями. При этом обработка должна осуществляться при наименьшем числе циклов нагружения и с минимизацией возможности образования усталостных повреждений.

Далее рассмотрим принципы такой обработки на примере балочных конструкций, поведение которых при колебаниях является наиболее простым.

В большинстве случаев виброобработка ведется в резонансном режиме. Это обусловлено тем, что в данном режиме резко возрастает амплитуда колебаний и коэффициент демпфирования, что позволяет создавать значительные вибрационные напряжения при небольших возмущающих усилиях. Для колебаний в режиме резонанса характерно возникновение одной из собственных форм колебаний (рис.1).

Для любой из форм колебаний можно

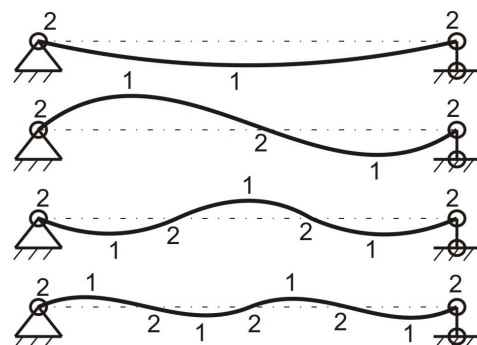
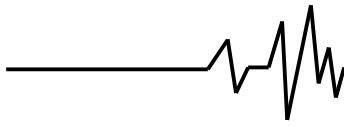


Рис. 1. Пример собственных форм колебаний для балки (1 – зоны пучности, 2 – нулевые зоны)

выделить четко определенные зоны: зоны пучности и нулевые зоны, которые характеризуются соответственно наибольшими



и минимальными амплитудами колебаний. Известно, что наибольшее рассеяние энергии происходит в зонах пучности [10], следовательно, параметры виброобработки должны быть таковы, чтобы зоны пучности совпадали с зонами конструкции, в которых необходимо создать наибольшие вибрационные напряжения.

В общем виде можно представить процесс виброобработки следующим образом (рис. 2).

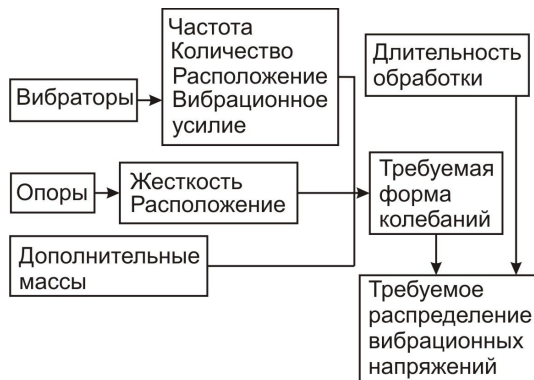


Рис. 2. Схема управляемой виброобработки

С точки зрения минимизации накопления усталостных повреждений длительность обработки должна быть минимальной. Это одновременно способствует и увеличению ресурса конструкции, и снижению затрат энергии на обработку. Поэтому следует стремиться к минимизации времени обработки.

Очевидно, что изменить положение зон пучности можно, выбрав другую собственную форму колебаний, т.е. изменив частоту или другие параметры виброобработки, которые влияют на форму колебаний конструкции.

Экспериментально установлено, что форма колебаний конструкции может быть изменена за счет смены расположения опор или применением дополнительных масс [11].

Для достижения максимального к.п.д. процесса необходимо, чтобы энергия рассеивалась преимущественно в конструкции, в том числе с использованием механизма пластической деформации, а значит, демпфирование в опорах должно приближаться к нулю. Следовательно, опоры должны располагаться в нулевых зонах. Изменение положения опор без учета расположения нулевых зон нецелесообразно, т.к. при этом возрастают потери энергии и снижается устойчивость конструкции при обработке.

Теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют, что жесткость опор не оказывает существенного влияния на процесс колебаний в режиме резонанса [11], следовательно, этот параметр режима не может использоваться для управления процессом виброобработки. Дополнительные массы позволяют изменить количество собственных форм и величину резонансных частот. Однако величина массы, которая оказывает заметное влияние на процесс колебаний, должна быть порядка 0,6 массы конструкции и более [11]. Наиболее эффективно применение дополнительных масс для конструкций и элементов малой жесткости.

Использование нескольких вибраторов целесообразно для длинномерных или пространственно развитых конструкций. Примерный R_E вибратора многими авторами определяется в 3 м [7, 12, 13]. С учетом эффекта автоматического уравнивания фаз вибраторы, расположенные на расстоянии, меньшем $2R_E$, и работающие в разной фазе, будут неизбежно фазироваться относительно друг друга. Одновременное применение нескольких вибраторов, работающих на разных частотах и расположенных на расстоянии больше $2R_E$, практически не изучено. Можно предположить, что отдельные элементы конструкции в пределах R_E будут колебаться независимо от воздействия других вибраторов, однако данная гипотеза нуждается в проверке.

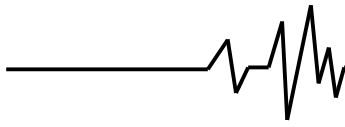
Учитывая все вышеизложенное, основными параметрами виброобработки, которые позволяют управлять процессом, являются частота и величина вибрационного усилия.

Строго говоря, величина вибрационного усилия не является полностью независимым параметром. Известно, что для дебалансных вибраторов величина вибрационного усилия представляет собой функцию вида:

$$P_v = 4 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot m_d \cdot f^2 \cdot R,$$

где n - число дебалансов в вибраторе; m_d - масса дебаланса; f - частота колебаний; R - радиус вращения центра тяжести дебаланса.

Следовательно, при неизменных геометрических и массовых параметрах вибратора вибрационное усилие зависит от квадрата частоты. Отдельные конструкции вибраторов позволяют регулировать вибрационное усилие изменением количества дебалансов, изменением угла их взаимного расположения на оси вращения или массой и



расположением центра тяжести вибратора. Однако в большинстве случаев процедура изменения сопряжена с необходимостью частичной разборки вибратора и не позволяет регулировать вибрационное усилие с высокой точностью.

Учитывая вышеизложенное, основным параметром, позволяющим изменять распределение вибрационных напряжений и управлять вибрационной обработкой, является частота обработки. Причем необходимо отметить, что диапазон частот, доступных для дебалансных вибраторов, ограничен полосой 10 – 200 Гц, а в большинстве случаев верхний предел составляет 100 Гц. Наиболее перспективным представляется случай, когда в пределах доступного для обработки диапазона находится максимальное количество собственных частот колебаний и соответствующих им разнообразных форм. Тогда становится возможным выбрать такую частоту обработки, при которой в зонах сварной конструкции с наибольшими пиковыми напряжениями или зонах, которые наиболее нагружены при эксплуатации формируются зоны пучности.

Следовательно, необходимо таким образом подобрать параметры виброобработки, чтобы количество собственных частот и форм колебаний в пределах диапазона работы вибратора было наибольшим. Такая задача может быть решена изменением собственных частот конструкции в сторону увеличения или уменьшения.

Известно, что последующие (верхние) собственные частоты могут быть рассчитаны после получения первой (низшей) собственной частоты с использованием принципа ортогональности собственных форм различными методами. Для нахождения первой собственной частоты и формы требуется определение прогибов в различных точках от статического нагружения по схеме, эквивалентной нагружению при вынужденных колебаниях.

Изменение величины прогибов от статического нагружения приводит к изменению первой собственной формы и соответственно всех высших форм. Таким образом, управление собственными формами может быть осуществлено изменением распределения и величины прогибов отдельных точек конструкции при статическом нагружении.

Рассмотрим возможные способы управления распределением и величиной прогибов на примере двухопорной балки, нагруженной сосредоточенной силой

(1 вибратор) (рис. 3).

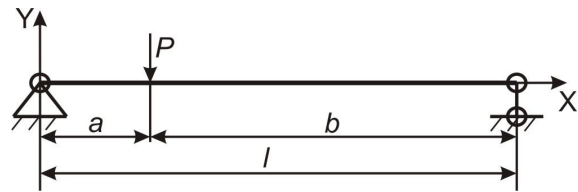


Рис. 3. Схема нагружения балки

Уравнение упругой линии, которое определяет величину прогибов, для данного случая, выглядит так [14]:

$$y(x) = \begin{cases} -\frac{Pa^2b^2}{6EJl} \left(2\frac{x}{a} + \frac{x}{b} - \frac{x^3}{a^2b} \right) & \text{при } 0 \leq x \leq a \\ -\frac{Pa^2b^2}{6EJl} \left(2\frac{l-x}{b} + \frac{l-x}{a} - \frac{(l-x)^3}{ab^2} \right) & \text{при } a \leq x, \end{cases}$$

где EJ - жесткость балки; P - статическое усилие, эквивалентное вибрационному; a, b, l - геометрические параметры схемы нагружения, показанные на рис. 3.

Расчеты показывают, что для балок постоянного сечения уравнение $y = f(a)$ представляет собой кривую, близкую к обратной параболе. Однако значительное уменьшение a приводит к снижению абсолютной величины прогибов и, следовательно, результативности обработки.

Тогда единственными параметрами, изменение которых позволяет изменить первую и последующие формы, являются длина и жесткость балки.

Технологически такие изменения возможны за счет применения блоков из конструкций, которые обрабатываются как одно целое [15,16] (рис. 4).

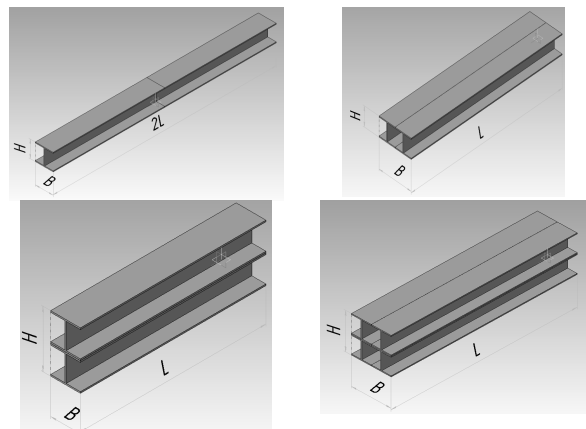
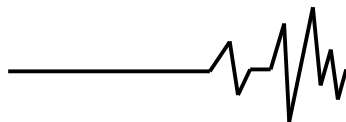


Рис. 4. Варианты применения блоков



Применение блоков позволяет изменять величину первой резонансной частоты, увеличивая и уменьшая ее в 4-5 раз при разумных схемах объединения.

Вывод. Для управления процессом виброобработки с целью создания необходимой величины вибрационных напряжений в определенных зонах сварной конструкции могут использоваться следующие технологические приемы: дополнительные массы, перемещение точки приложения вибрационного усилия и применение блоков конструкций. Применение схемы нагружения с использованием нескольких вибраторов, работающих на разной частоте, требует отдельного изучения. Принципы управления процессом обработки могут быть использованы для любых типов конструкций с учетом их особенностей.

Список источников

1. Зубченко О.И. Применение вибрационного нагружения для снятия остаточных напряжений в сварных рамах / О.И. Зубченко, А.А. Грузд, Г.Т. Орехов, А.Г. Состин // Автоматическая сварка, - 1974. - № 9. - С. 64 - 66.
2. Полнов В.Г. Определение режимов вибрационной обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений / В.Г. Полнов, М.Н. Могильнер // Сварочное производство, - 1984. - № 2. - С. 32 - 33.
3. Сутырин Г.В. Влияние вибрации низкой частоты на величину остаточных напряжений и деформаций при сварке / Г.В. Сутырин, Н.Э. Банцерж, В.С. Белосельский, В.Г. Смирнов, В.Г. Лобицкий. // Сварочное производство, - 1973. - № 6. - С. 31 - 32
4. Соломатин В.Е. Влияние низкочастотной виброобработки на свойства сварных соединений стали 16Д / В.Е. Соломатин, И.М. Изюрьев, Ф.М. Бабина // Автоматическая сварка, - 1984. - № 2. - С. 72 - 73.
5. Дрыга А.И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении: Теория, исследования, технология / Донбасская гос. машиностроительная академия. - Краматорск : ДГМА, 2004. - 167с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 155-167.
6. В.И. Штефан, А.В. Тентлер, В.Е. Подольский (ФГУП МП «ЗВЕЗДОЧКА») Управление процессом снятия остаточных механических напряжений в стальных конструкциях на ФГУП МП «ЗВЕЗДОЧКА» с

помощью приборов «Комплекс-2.05» <http://td.ru/content/view/15/21/>

7. Петров А.Ф. Вибрационная обработка деталей для снятия напряжений / А.Ф. Петров // Металловедение и термическая обработка металлов, - 1990. - № 1. - С. 45.
8. Даусон Р. Вибрационное снятие напряжения и исследование его эффективности / Р. Даусон, Д.Ж.Моффат // Теоретические основы, - 1980, т. 102, №2 с.1-9.
9. Гедрович А. И. Оценка изменения циклической долговечности в результате виброобработки сварных строительных конструкций / А.И. Гедрович, А.Б. Жидков, А.В. Хижняк // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. - Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2009. - № 2. - С. 226 - 231
10. Жидков А.Б. Мониторинг процесса вибрационной обработки путем контроля превращения энергии пластической деформации / А.Б. Жидков, Р.Н. Паненко // «Зварювання та споріднені процеси і технології» Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих науковців: - Миколаїв: НУК, 2008, С. 51-52.
11. Жидков А.Б. Исследование влияния характеристик опор и дополнительных масс на АЧХ балочных конструкций. / А.Б. Жидков, В.А. Сысоев // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Луганськ: вид-во СЛУ ім. В. Даля, 2009. - С. 202 - 209.
12. Гедрович А.И. Оценка неравномерности снижения остаточных напряжений при виброобработке сварных соединений / А.И. Гедрович, А.Б. Жидков // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. - 2009. - № 2(55), Ч.1 - С. 40 - 43.
13. Жидков А.Б. Новые методы управления процессом вибрационной обработки с целью снижения остаточных напряжений / А.Б.Жидков, Р.Н. Паненко // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. - К: НАУ. - 2008. - Вип. 49. - Т. 2 - С. 18 - 24.
14. Справочник по сопротивлению материалов /Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Наук. думка, 1988. - 736 с.
15. А.с. СССР 897441, кл. В 23 К 28/00, 1982.
16. А.с. СССР 637233, кл. В 23 Р 25/00, В 24 В 31/06, 1978.