

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-176-180
УДК 621.9.048.6

М.А. Будниченко, В.П. Городищенский, Д.А. Лужанский, В.А. Некрасов
АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, Россия

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Объект и цель научной работы. Объектом научной работы является обечайка – сварная крупногабаритная металлическая конструкция, изготовленная АО «ПО «Севмаш». Цель работы – определение виброакустических критериев эффективности низкочастотной виброобработки.

Материалы и методы. Исследования динамических характеристик обечайки методом ударного возбуждения проводились в процессе ее низкочастотной виброобработки, являющейся промежуточной, технологической операцией перед механической обработкой.

Основные результаты. Основным результатом работы является определение набора виброакустических критериев эффективности низкочастотной виброобработки сварных металлоконструкций типа «обечайка».

Заключение. В работе показано, что контроль амплитудно-частотных характеристик может быть использован для оценки эффективности (достаточности) низкочастотной виброобработки.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, виброускорение, мода колебаний, взаимный спектральный анализ, коэффициент механических потерь, низкочастотная виброобработка, сварная металлоконструкция, частота.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-176-180
UDC 621.9.048.6

M. Budnichenko, V. Gorodishensky, D. Luzhansky, V. Nekrasov
JSC Sevmash, Severodvinsk, Russia

VIBROACOUSTIC EFFICIENCY CRITERIA FOR LOW-FREQUENCY VIBRATION TREATMENT OF WELDED METAL STRUCTURES

Object and purpose of research. This paper studies a large welded sidewall structure manufactured at Sevmash. The purpose of the study is to determine vibroacoustic efficiency criteria for low-frequency vibration treatment.

Materials and methods. Dynamic parameters of the sidewall were studied by exciting it by impact during its low-frequency treatment, an intermediate operation prior to mechanical processing.

Main results. This work identified vibroacoustic efficiency criteria for low-frequency vibration treatment of welded sidewall structures.

Conclusion. This work shows that monitoring of amplitude-frequency parameters could be applied in assessment of efficiency (sufficiency) for low-frequency treatment.

Keywords: amplitude-frequency characteristic, vibration acceleration, vibration mode, cross-spectral analysis, mechanical loss coefficient, low-frequency vibration treatment, welded structure, frequency.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Будниченко М.А., Городищенский В.П., Лужанский Д.А., Некрасов В.А. Виброакустические критерии эффективности низкочастотной виброобработки сварных металлоконструкций. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 176–180.

For citations: Budnichenko M., Gorodishensky V., Luzhansky D., Nekrasov V. Vibroacoustic efficiency criteria for low-frequency vibration treatment of welded metal structures. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 176–180 (in Russian).

Введение

Introduction

В современном судостроении используется большое количество сварных металлоконструкций. После сварки в этих конструкциях появляются нераспределенные остаточные напряжения, вследствие чего возможны такие негативные последствия, как изменение формы и размеров конструкции. С целью снижения остаточных напряжений данные конструкции подвергаются низкочастотной вибрационной обработке (НВО). Сущность процесса НВО заключается в воздействии на конструкцию, установленную на виброизолирующих опорах, знакопеременными нагрузками на резонансных или околорезонансных частотах. В результате такого воздействия снижаются уровни остаточных напряжений, стабилизируются форма и размеры конструкций.

Измерения, оценка и диагностика остаточных напряжений могут выполняться различными способами, основанными на контроле изменений физических характеристик металла. С основными методами неразрушающего контроля и измерения остаточных напряжений можно ознакомиться в [1].

Наиболее распространенным способом контроля эффективности НВО в настоящее время является отслеживание изменений остаточных напряжений в конструкциях методом рентгеновской дифрактометрии напряженного состояния, однако этот способ требует больших временных и финансовых затрат в силу длительности процесса измерения величины остаточных напряжений и дороговизны оборудования.

Еще одним способом контроля, который упоминается в [2], является контроль эффективности НВО по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ), пока не нашедший широкого практического применения из-за отсутствия указаний по выбору критериев оценки эффективности НВО по АЧХ.

Проверка чувствительности амплитудно-частотных характеристик к изменениям динамических характеристик металлоконструкции в процессе низкочастотной вибрационной обработки

Check of amplitude and frequency parameters sensitivity to the changes in dynamic properties of metal structure undergoing low-frequency vibration treatment.

С целью выявления параметров АЧХ сварной металлоконструкции, чувствительных к НВО, авто-



Рис. 1. Обечайка

Fig. 1. Sidewall structure

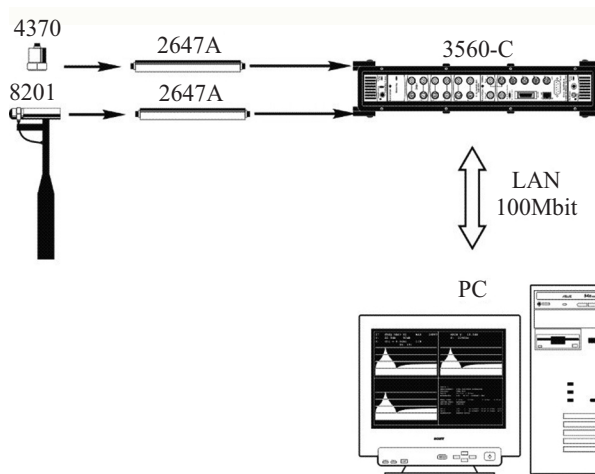


Рис. 2. Блок-схема измерительного тракта

Fig. 2. Flow-chart of instrumentation tract

рами были проведены измерения АЧХ нескольких однотипных сварных цилиндрических конструкций типа «обечайка» до и после НВО. Внешний вид обечайки приведен на рис. 1. Обечайка состоит из двух гнутых полукруглых деталей, сваренных между собой.

Измерения АЧХ обечайки проводились в соответствии с требованиями, приведенными в [3]. Блок-схема измерительного тракта изображена на рис. 2. Возбуждение колебаний обечайки осуществлялось ударом калиброванным молотком 8201 в точке, показанной на рис. 1. Для измерений динамической силы использовался датчик силы, встроенный в калиброванный молоток. Для измерений виброускорения отклика использовался акселерометр типа 4370. Оба датчика подключались к анализатору сигналов Pulse 3560-C через предусилитель заряда 2647A. Для спектральной обработки и усреднения сигналов использовалось базовое программное обеспечение анализатора Pulse Lab Shop.

Таблица 1. Влияние низкочастотной вибрационной обработки на модальные параметры обечайки
Table 1. Effect of low-frequency vibration treatment upon modal parameters of the sidewall structure

Параметр	2 мода		3 мода		4 мода		5 мода	
	до	после	до	после	до	после	до	после
Собственная частота, Гц	44,43	44,59	70,13	70,34	125,47	125,49	171,49	172,38
Максимум модуля АЧХ, дБ	30,2	30,6	17,1	17,8	34,6	39,5	30,4	31,9
Коэффициент механических потерь, $\times 10^{-2}$	1,76	1,61	1,74	1,59	1,14	0,72	0,58	0,62

Таблица 2. Относительные изменения параметров мод колебаний обечайки в результате низкочастотной вибрационной обработки

Table 2. Relative changes in vibration mode parameters of the sidewall as a result of the low-frequency vibration treatment

Параметр	2 мода	3 мода	4 мода	5 мода
Собственная частота, %	0,4	0,3	0	0,5
Максимум модуля АЧХ (в линейных единицах), %	5	8	76	19
Коэффициент механических потерь, %	-9	-9	-37	7
Изменение формы АЧХ	нет	нет	да	да

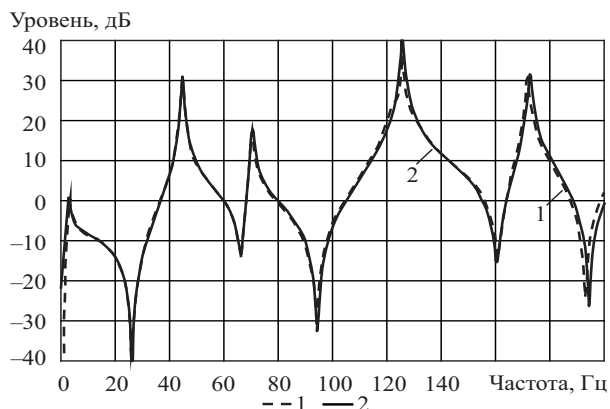


Рис. 3. Модули АЧХ обечайки, измеренные до (1) и после (2) низкочастотной вибрационной обработки

Fig. 3. Moduli of amplitude-frequency parameters for the sidewall structure, as measured before (1) and after (2) low-frequency vibration processing

АЧХ обечайки определялась как функция $H1(f)$ математического аппарата взаимного спектрального анализа [4] по формуле

$$H1(f) = \frac{\bar{G}_{FA}(f)}{\bar{G}_{FF}(f)}, \quad (1)$$

где $\bar{G}_{FA}(f)$ – усредненный по нескольким ударам взаимный спектр сигнала динамической силы, измеренного датчиком силы калиброванного молотка, и виб-

роускорения, измеренного акселерометром; $\bar{G}_{FF}(f)$ – усредненный по нескольким ударам автоспектр сигнала силы.

На рис. 3 изображены частотные зависимости логарифмических уровней модуля АЧХ типичные для этой группы сварных металлоконструкций. В табл. 1 приведены измеренные до и после НВО значения собственных частот мод колебаний, уровней максимумов модулей АЧХ и коэффициентов механических потерь, определенных методом полярных диаграмм Найквиста [5] для 2–5 мод колебаний, заметно отреагировавших на НВО.

Как видно из полученных результатов, выполнение НВО приводит к изменениям АЧХ обечайки вблизи собственных частот мод колебаний выше 1-й, а параметры этих мод колебаний могут быть рассмотрены в качестве критериев эффективности НВО. 1-я мода колебаний не отреагировала на НВО, поскольку на этой моде обечайка колеблется на виброизолирующих опорах, как единое целое без значимых собственных деформаций.

Выбор критериев эффективности низкочастотной вибрационной обработки

Selection of efficiency criteria for low-frequency vibration treatment

В табл. 2 приведены относительные изменения модальных параметров обечайки, рассчитанные по

данным табл. 1. Дополнительно к численным параметрам изменений в таблицу внесено качественное изменение, а именно изменение формы АЧХ в зоне моды колебаний.

Анализ данных, приведенных на рис. 1 и в табл. 1 и 2, а также результаты наблюдений за изменениями АЧХ обечаек в процессе выполнения НВО позволяют сделать следующие выводы:

1. В процессе проведения НВО АЧХ обечайки вначале заметно изменяется и через некоторое время обработки (свое для каждой обечайки) стабилизируется.
2. Наиболее чувствительными к изменениям динамических характеристик в ходе НВО описанной в данной работе обечайки являются 4-я и 5-я моды колебаний, однако у некоторых других обследованных обечаек наиболее чувствительными были и другие моды.
3. Наиболее чувствительными к НВО параметрами мод колебаний являются коэффициент механических потерь, величина резонансного максимума и форма АЧХ в зоне резонансного подъема.
4. Поскольку величина, диапазон и скорость изменений указанных параметров в каждом случае различны, то решение об эффективности (достаточности) проведенной НВО следует принимать по стабилизации АЧХ в целом, т.е. по прекращению изменений всех рассмотренных в данной работе параметров.
5. Результаты контроля эффективности НВО по АЧХ хорошо коррелируют с результатами контроля, полученными с помощью общепринятого рентгенографического исследования напряженного состояния конструкций.

Заключение

Conclusion

В результате исследований, проведенных авторами в рамках данной работы, в качестве основного виброакустического критерия эффективности (достаточности) НВО обечайки выбрана стабилизация ее АЧХ. Контроль эффективности НВО с использованием этого критерия по сравнению с традиционным рентгенографическим методом контроля обладает следующими преимуществами:

- значительно уменьшается трудоемкость проведения НВО (в АО «ПО «Севмаш» около 7 раз);

- существенно сокращается длительность проведения контрольной операции (в АО «ПО «Севмаш» около 10 раз), что позволяет внедрить 100 % контроль эффективности НВО обрабатываемых изделий, в то время как рентгенографическое измерение остаточных напряжений в силу технических сложностей проводится выборочно на отдельных изделиях.

Достигнутая техническая и экономическая эффективность предложенного метода контроля достаточности НВО является подтверждением актуальности его распространения на более сложные, чем обечайки, сварные металлоконструкции и выбранными авторами направления совершенствования технологии их изготовления.

Библиографический список

1. Венгринович В.Л. Принципы и практика диагностики напряженно-деформированного состояния конструкций, изделий и сварных соединений // В мире неразрушающего контроля. 2005. № 1(27). С. 4–9.
2. РД5Р.ГКЛИ.0104-216-95. Снижение уровня остаточных напряжений и деформаций деталей и корпусных конструкций методом низкочастотной вибрационной обработки. Л.: ЦНИИТС, 1995.
3. ГОСТ ИСО 7626-5-99. Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. М., 1999.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.
5. Некрасов В.А. Определение коэффициента потерь методом полярных диаграмм Найквиста // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал. 2016. № 4(34). Т. 2. С. 22–27.

References

1. Vengrinovich V. Fundamentals and practice of stress-strain state diagnostics for structures, articles and welded joints // NDT World. 2005. No. 1(27). P. 4–9 (in Russian).
2. RD5R.GKLI.0104-216-95. Mitigation of residual stresses and strains in details and hull structures by means of low-frequency vibration treatment. Leningrad: SSTC, 1995 (in Russian).
3. Standard GOST ISO 7626-5-99. Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility. Moscow, 1999 (in Russian).
4. Bendat J., Piersol A. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. Moscow: Mir, 1989 (Russian translation).
5. Nekrasov V. Loss coefficient measurement by Nyquist diagram method // Marine intellectual technologies. 2016. No. 4(34). Vol. 2. P. 22–27 (in Russian).

Сведения об авторах

Будниченко Михаил Анатольевич, к.т.н., генеральный директор АО «ПО «Севмаш». Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, Архангельская область, Архангельское шоссе, 58. Тел.: 8 (8184) 50-46-01. E-mail: smp@sevmash.ru.

Городищенский Вячеслав Павлович, ведущий инженер-конструктор АО «ПО «Севмаш». Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, Архангельская область, Архангельское шоссе, 58. Тел.: 8 (8184) 50-47-17. E-mail: smp@sevmash.ru.

Лужанский Дмитрий Анатольевич, ведущий инженер-конструктор АО «ПО «Севмаш». Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, Архангельская область, Архангельское шоссе, 58. Тел.: 8 (8184) 50-47-17. E-mail: smp@sevmash.ru.

Некрасов Владимир Александрович, к.т.н., начальник сектора АО «ПО «Севмаш». Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, Архангельская область, Архангельское шоссе, 58. Тел.: 8 (8184) 50-47-17. E-mail: smp@sevmash.ru.

About the authors

Mikhail A. Budnichenko, Cand. Sci (Eng.), Director General, JSC PO Sevmash. Address: 58, Arkhangelskoye shosse, Severodvinsk, Arkhangelsk Oblast, Russia, post code 164500. Tel.: 8 (8184) 50-46-01. E-mail: smp@sevmash.ru.

Vyacheslav P. Gorodishensky, Lead Naval Architect, JSC PO Sevmash. Address: 58, Arkhangelskoye shosse, Severodvinsk, Arkhangelsk Oblast, Russia, post code 164500. Tel.: 8 (8184) 50-47-17. E-mail: smp@sevmash.ru.

Dmitry A. Luzhansky, Lead Naval Architect, JSC PO Sevmash. Address: 58, Arkhangelskoye shosse, Severodvinsk, Arkhangelsk Oblast, Russia, post code 164500. Tel.: 8 (8184) 50-47-17. E-mail: smp@sevmash.ru.

Vladimir A. Nekrasov, Cand. Sci (Eng.), Head of Sector, JSC PO Sevmash. Address: 58, Arkhangelskoye shosse, Severodvinsk, Arkhangelsk Oblast, Russia, post code 164500. Tel.: 8 (8184) 50-47-17. E-mail: smp@sevmash.ru.

Поступила / Received: 24.08.18
Принята в печать / Accepted: 10.11.18
© Коллектив авторов, 2018