

УДК 621.791:539

В.К. Лобанов, професор, д-р техн. наук**Г.И. Пашкова, канд. техн. наук**

ГП «Завод им. В.А. Малышева»

ул. Плехановская, 126, г. Харьков, Украина, 61037

marketing@malyshev.kharkov.ua

РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Изучалось влияние тепловой и вибрационной обработки на комплексные характеристики сварных конструкций. Показана эффективность метода вибрации с применением импульсной разгрузки для снижения уровня остаточных напряжений в 1,42-1,75 раза и обеспечения геометрической стабильности сварных деталей.

Ключевые слова: пластическая деформация, сварные конструкции, вибрационная обработка, остаточные напряжения.

Регулирование уровня остаточных напряжений и стабилизация геометрических размеров сварных конструкций является одной из основных задач машиностроения. Потенциальным источником возникновения таких напряжений служит неравномерная пластическая деформация, обусловленная термическим воздействием при сварке.

Для стабилизации уровня остаточных напряжений, формы и размеров конструкций применяются различные релаксационные процессы. Наиболее универсальный из них – термическое воздействие путем высокого отпуска деталей (600...650°C) [1]. Однако этот способ требует значительных затрат энергоносителей. Поэтому в настоящее время получили распространение методы стабилизации остаточных напряжений и геометрии деталей с помощью вибрационной обработки [2], которая является высокопроизводительным методом, пригодным для сборных, литых, кованных, сварных и горячекатаных конструкций из черных и цветных металлов.

Кроме того, вибростабилизация применима к конструкциям любых размеров и массы, а оборудование, необходимое для ее осуществления, является весьма простым и малогабаритным. Свобода от многих побочных эффектов, сопровождающих тепловое снятие напряжений – искривление, деформирование, снижение уровня механических свойств, делает процесс еще более привлекательным.

Наиболее широкое применение получила вибрационная обработка с возбуждением в деталях вынужденных незатухающих колебаний определенной амплитуды. Это позволяет значительно снизить энергозатраты и трудоемкость при проведении стабилизирующей обработки, однако связано с использованием вибраторов, создающих определенный уровень шума, что не всегда приемлемо, а также с необходимостью выбора для каждой конкретной детали основных параметров вибрационного воздействия (вида динамического напряженного состояния, необходимого уровня динамических напряжений, условий крепления детали и т.д.).

Разработан метод вибрационного воздействия, свободный от указанных недостатков. Суть его заключается в возбуждении в детали свободных затухающих колебаний в результате практически мгновенного (импульсного) снятия приложенной заранее статической нагрузки (ВИР-метод) [3]. Целесообразно определить эффективность указанного способа вибрационной обработки для стабилизации уровня остаточных напряжений в зоне шва и обеспечения геометрической стабильности сварных деталей.

Целью настоящей работы являлось определение действительных остаточных напряжений в ходовой раме троллейбуса, возникших в результате сварки ее отдельных частей и приваривания литых кронштейнов, и оценка эффективности различных видов релаксационной обработки для снижения уровня остаточных напряжений в зоне шва и обеспечения стабильности геометрических размеров деталей.

В качестве объектов исследования были использованы модельные образцы из стали 3 с приваренной пластиной из стали 35Л, вырезанные непосредственно из сварного элемента троллейбусной рамы (рисунок 1).

Исследованы следующие варианты релаксационной обработки:

- отпуск при температуре $650 \pm 10^\circ\text{C}$, 1,5 ч;
- вибрационная обработка путем возбуждения вынужденных резонансных колебаний (ВРК-метод);
- метод вибрации с применением импульсной разгрузки (ВИР-метод).

В качестве исходного принят вариант со сваркой без последующей обработки.

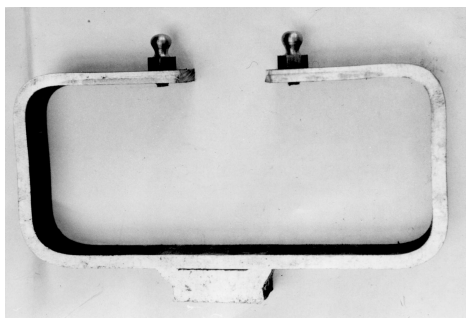


Рисунок 1 – Общий вид модельного образца

Возбуждение вынужденных резонансных колебаний в образцах осуществляли с использованием универсальной установки модели 489Р, состоящей из подпружиненного вибростола с укрепленным на нем дебалансным вибратором типа ИВ-98 и пульта управления, позволяющего плавно изменять частоту нагружения от 20 до 100 Гц, регулировать возмущающую силу на резонансных частотах в пределах до 12 кН, регистрировать ток, потребляемый вибровозбудителем, и частоту возбуждения колебаний (рисунок 2, а).

Опытная установка для обработки ВИР-методом представляет собой специальное приспособление для импульсной разгрузки образцов, установленное на универсальную машину типа УМЭ-10ТМ. Приспособление состоит из нагружающего устройства, которое с помощью тарельчатых пружин и спускового механизма с большой скоростью отбрасывает пуансон от образца, в результате чего в освобожденном от статической нагрузки образце возникают свободные затухающие колебания (рисунок 2, б).

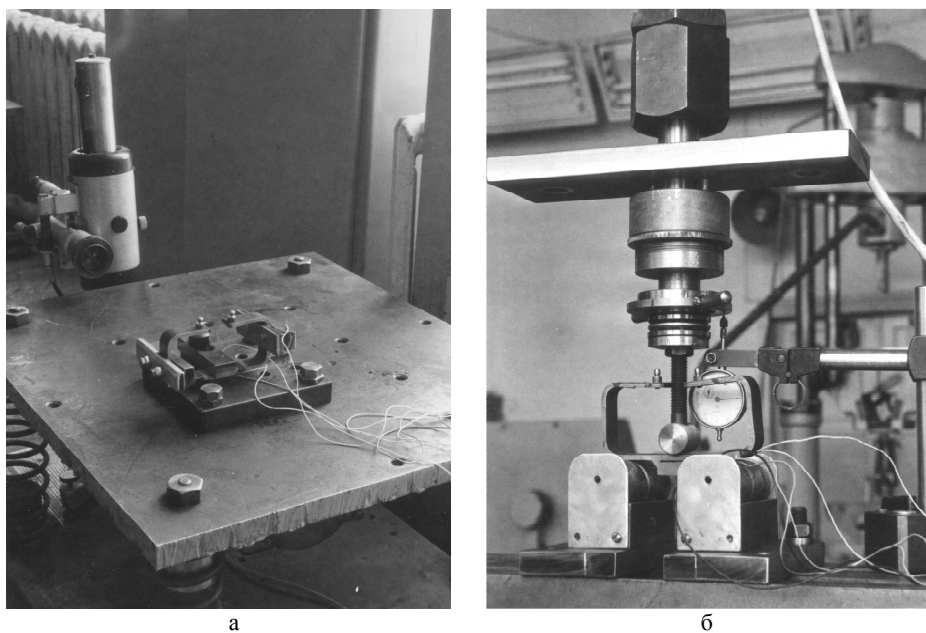


Рисунок 2 – Схема вибрационной обработки образцов:
а – путем возбуждения вынужденных колебаний;
б – способом вибрационной импульсной разгрузки

Значения остаточных макронапряжений определяли на поверхности образцов рентгеновским $\sin^2\psi$ -методом на стационарном дифрактометре типа ДРОН-3 в излучении Сг-анода. Оценку геометрической стабильности образцов проводили путем определения остаточной деформации (ΔL) после испытаний образцов при действии на них в течение 144 ч статической нагрузки равной 0,8 предела пропорциональности ($\sigma_{пл}$). Деформация образцов фиксировалась путем измерения изменения расстояния между бобышками, установленными по обе стороны разреза (см. рисунок 1).

Статистическую обработку полученных результатов осуществляли по стандартной методике [4]. Оценку однородности распределения остаточных напряжений вблизи сварного шва определяли по величине среднего квадратического отклонения (S).

Обработка ВИР-методом проводилась при различных значениях начального статического усилия (0,6 кН; 1,0 кН; 1,4 кН), которые соответствуют напряжениям в зоне сварки равным $0,28\sigma_{\text{ст}}$; $0,45\sigma_{\text{ст}}$; $0,6\sigma_{\text{ст}}$, и при разном количестве циклов нагружения.

Результаты определения значений остаточных напряжений в сварных образцах приведены в таблице 1.

Как свидетельствуют полученные данные, наиболее целесообразной является пятикратная обработка ВИР-методом, так как при однократной обработке практически не происходит изменения величины остаточных напряжений по сравнению с исходным вариантом, а увеличение количества циклов обработки до 10 приводит к некоторому росту значений остаточных напряжений по сравнению с пятикратной обработкой и вызывает увеличение неоднородности их распределения. Установлено, что уменьшение остаточных напряжений вблизи сварного шва наряду с их наибольшей однородностью обеспечивается при значении начальной статической нагрузки 1,0 кН.

Поэтому дальнейшие результаты приведены для ВИР-обработки по оптимальному режиму (величина начального статического усилия 1,0 кН, количество циклов нагружения – 5).

Таблица 1 – Влияние параметров ВИР-обработки на величину остаточных напряжений в сварных образцах

№ п/п	Параметры ВИР-обработки		Среднее значение ост, МПа	S
	Начальная статическая нагрузка, кН	Количество циклов нагружения		
1	0,6	исходный	- 210	26,8
		1	- 205	12,1
		5	- 195	39,0
		10	- 220	22,7
2	1,0	исходный	- 255	31,2
		1	- 250	17,5
		5	- 203	7,6
		10	- 260	35,4
3	1,4	исходный	- 250	33,1
		1	- 230	32,3
		5	- 223	21,9
		10	- 240	36,6

В таблицах 2 и 3 представлены результаты исследования остаточных напряжений и остаточной деформации модельных образцов, характеризующие влияние на них различных стабилизирующих обработок.

Таблица 2 – Влияние различных стабилизирующих обработок на уровень остаточных напряжений в сварных образцах

№ п/п			Вариант обработки		Значения остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$, МПа					
					Расстояние от края сварного шва				$\sigma_{\text{ост}}$ (среднее)	S
					Левая сторона		Правая сторона			
					2 мм	1 мм	1 мм	2 мм		
1	отпуск	исходный	- 160	- 200	- 250	- 180	- 197,5	38,6		
		650 ± 10°C, 1,5 ч	- 80	- 115	- 85	- 78	- 89,5	17,2		
2	ВРК- обработка*	исходный	- 215	- 225	- 190	- 220	- 212,5	15,5		
		30 сек	- 130	- 105	- 110	- 95	- 110	14,6		
		900 сек	- 95	- 65	- 145	- 75	- 95	35,5		
3	ВИР- обработка**	исходный	- 260	- 220	- 280	- 300	- 265	34,1		
		5 циклов	- 170	- 155	- 160	- 175	- 165	9,2		

* – при частоте 100 Гц;

** – начальная статическая нагрузка 1 кН

Анализ полученных результатов (см. таблицу 2) свидетельствует о том, что отпуск при температуре $650 \pm 10^\circ\text{C}$ приводит к снижению значений остаточных напряжений в 2,2 раза, существенно повышая при этом однородность их распределения, что подтверждается подсчетом выборочного среднеквадратического отклонения. Снижение остаточных напряжений при таком отпуске сопровождается некоторой остаточной деформацией образцов (см. таблицу 3).

Вибрационная обработка путем возбуждения вынужденных незатухающих колебаний на резонансных режимах также понижает уровень остаточных напряжений в сравнении с исходным вариантом в 1,9-2,24 раза. При этом, судя по значениям S , виброобработка в течение 30 секунд позволяет уменьшить неоднородность распределения остаточных напряжений. Увеличение времени ВРК-обработки до 900 секунд приводит к существенному увеличению неоднородности распределения $\sigma_{ост}$.

Следует подчеркнуть, что длительная виброобработка в резонансном режиме при высоких значениях амплитуд напряжений ($0,5 \dots 0,7 \sigma_{нц}$) приводит к образованию в сварных швах микротрещин и даже к разрушению образцов. Кроме того, при такой обработке возникает значительная остаточная деформация (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Влияние различных стабилизирующих обработок на величину остаточной деформации сварных образцов

№ п/п	Вариант обработки	Величина остаточной деформации ΔL , мм
1	Сварка без последующей обработки (исходный)	0,51
2	Отпуск при $650 \pm 10^\circ\text{C}$, 1,5 ч	0,21
3	Вибрационная обработка ВРК-способом* в течение 30 с	0,19
4	Вибрационная обработка ВРК-способом* в течение 900 с	1,3
5	Вибрационная обработка ВИР-методом (1 кН, 5 циклов)	0,20

* – при частоте 100 Гц

Таким образом, при использовании метода возбуждения вынужденных колебаний на резонансной частоте следует тщательно подбирать время обработки, чтобы избежать искусственного снижения долговечности детали в условиях последующей эксплуатации.

От указанных недостатков свободен метод ВИР-обработки, позволяющий, с одной стороны, строго регулировать уровень напряжений путем задания величины начальной статической нагрузки, а с другой стороны, использовать минимально необходимое количество циклов нагружения.

ВИР-обработка при оптимальном режиме приводит к уменьшению значений остаточных напряжений вблизи сварного шва, обеспечивая одновременно наибольшую однородность их распределения.

Из приведенных в таблице 3 данных следует, что отпуск при $650 \pm 10^\circ\text{C}$, виброобработка ВРК-методом в течение 30 сек и ВИР-обработка по оптимальному режиму приводят практически к одинаковым значениям остаточной деформации, вдвое меньшим, чем у образцов после сварки. Это позволяет сделать вывод о высокой эффективности вибрационной обработки для стабилизации геометрии деталей.

Таким образом, проведенное сравнение эффективности исследованных стабилизирующих обработок показало, что эти методы позволяют снизить остаточные макронапряжения в 1,6...2,3 раза, а также (при оптимальных режимах) обеспечивают уменьшение среднеквадратического отклонения величины напряжений, характеризующего неоднородность их распределения вблизи сварного шва, в 1,1...3,7 раза.

Показана практически одинаковая эффективность исследованных методов для стабилизации размеров образцов при воздействии на них длительного статического нагружения в упругой области.

Установлено, что остаточные макронапряжения не являются единственным определяющим критерием вибрационной обработки, так как величина снижения и их абсолютные значения не связаны однозначно со стабильностью размеров образца или детали.

Варьированием основных параметров ВИР-обработки выявлено, что наиболее эффективным является режим, при котором сумма начальных динамических и остаточных напряжений примерно на 10 % превышает предел пропорциональности $\sigma_{нц}$ при выбранной схеме нагружения. Причем для создания более однородного напряженного состояния число циклов обработки должно равняться 5.

Следовательно, вибрационная обработка является эффективным способом снижения уровня остаточных напряжений в сварных деталях и стабилизации их геометрии, причем из двух исследованных способов более предпочтительным является метод виброобработки импульсной разгрузкой как более управляемый, менее энергоемкий и не требующий защиты от шума.

Библиографический список использованной литературы

1. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений / В.А. Винокуров. — М.: Машиностроение, 1983. — 215 с.
2. Дрыга А.И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. Теория, исследования, технология / А.И. Дрыга. — Краматорск: ДГМА, 2004. — 168 с.

3. А. с. № 637232 СССР. Способ снижения остаточных напряжений в деталях / В.Г. Алешинский, В.Н. Киселев, В.Д. Пененко, В.А. Скаженик, М.Л. Туревский, Д.Я. Фурман. Опубл. 1978, Бюл. № 46.

4. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М.Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.

Поступила в редакцию 23.03.2012 г.

Лобанов В.К., Пашкова Г.І. Регулювання рівня залишкової напруги в зварних конструкціях

Вивчався вплив теплової і вібраційної обробки на комплексних характеристики зварних конструкцій. Показана ефективність методу вібрації із застосуванням імпульсного розвантаження для зниження рівня залишкової напруги в 1,42-1,75 разу і забезпечення геометричної стабільності зварних деталей.

Ключові слова: пластична деформація, зварні конструкції, вібраційна обробка, залишкова напруга.

Lobanov V.K., Pashkova G.I. Adjusting the remaining tension level in welded constructions

The influence of thermal and vibratory treatments to the complex characteristics of welded constructions was studied. The efficiency of the method of vibration with a pulse discharge in order to reduce the level of residual stresses in the 1,42-1,75 times and ensure a geometric stability of details is showed.

Keywords: plastic deformation, welded constructions, vibration treatment, remaining tensions.