

# ВЛИЯНИЕ ВИБРООБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ И ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины.  
01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В работе на основе комплексной диаграммы предельных напряжений цикла предложен метод выбора неповреждающих режимов виброобработки элементов металлоконструкций с целью эффективного снижения в них остаточных напряжений без опасности усталостного повреждения на стадии технологической обработки. Данный метод апробирован на примере испытаний конструктивных элементов из стали 20 и концевой пятника из стали 20ГФЛ соединительной балки восьмиосной железнодорожной цистерны. Сравнительные усталостные испытания показали увеличение долговечности обработанных сварных образцов в 2,5 раза и повышение их предела выносливости на 40 %. В процессе виброобработки кольцевого элемента из стали Ст.3 уменьшение остаточных напряжений сопровождается увеличением его демпфирующей способности. С ростом максимальных напряжений цикла повышение декремента колебаний происходит на большую величину, а его стабилизация по времени совпадает со стабилизацией остаточного напряжения. Это позволяет судить об окончании процесса по изменению и последующей стабилизации декремента колебаний. Установленное уменьшение демпфирующей способности исследуемого образца после виброобработки свидетельствует о его деформационном старении, указывающем на пластическое деформирование в ходе обработки. С повышением амплитуды напряжений цикла уменьшается деформация образца при последующем после виброобработки выживании до 1500 ч, а снижение исходных остаточных напряжений растяжения до 0,51 предела текучести материала приводит к его геометрической стабильности. Библиогр. 25, табл. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* виброобработка, сварное соединение, остаточные напряжения, предел выносливости, амплитуда напряжений цикла, предел циклической ползучести, декремент колебаний

Целесообразность и эффективность экологически чистого технологического процесса виброобработки (ВО) сварных и литых деталей для снижения в них остаточных напряжений (ОН) растяжения, которые могут уменьшить срок службы изделия [1, 2], или изменить его форму [3], характеризуется низкими энергозатратами, подтвержден мировым и отечественным опытом [4, 5]. Производительность метода (продолжительность обработки занимает не более 40 мин) заключается в том, что, подвергая циклическому нагружению в целом всю конструкцию, ОН снижаются в ее элементах, обладающих разной жесткостью, за один технологический цикл.

Однако недостаток ВО в том, что величина временных напряжений, создаваемых механическими вибраторами, подбирается опытным путем. Это может привести к тому, что амплитуда напряжений окажется либо недостаточной для требуемого снижения ОН, либо настолько большой, что может привести к возникновению усталостных повреждений уже на технологической стадии обработки [6]. Наряду с косвенными способами контроля процесса ВО, в частности, по изменению тока, потребляемого вибратором [7, 8], смещению резонансных пиков по

шкале частот [9], используется способ контроля по изменению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) [10], заключающийся в том, что к концу ВО одновременно уменьшается ширина резонансного пика и увеличивается амплитуда колебаний. Это явление указывает на уменьшение рассеиваемой энергии в обрабатываемом изделии. Подтверждением тому имеются литературные данные [11] виброобработки половинок сварной станины машины постоянного тока массой 7000 кг каждая, которые показали снижение декремента колебаний  $\delta$  с 12,3 до 9 %.

Декремент определялся по ширине резонансных пиков, записанных до и после ВО [12]. Однако известно, что снижение ОН в материале конструкции происходит только в результате пластической деформации [13], наличие которой должно приводить к увеличению рассеяния энергии в материале [12]. Явное противоречие в направленности изменения декремента колебаний материала с наблюдаемым на практике декрементом колебаний изделия может быть объяснено тем, что в располагаемых на полу обрабатываемых изделиях наряду с рассеянием энергии в материале имеет место также конструкционное рассеяние энергии, изменение которого главным образом и отражается на АЧХ. Данное предполо-

жение подтверждают, во-первых, большие полные абсолютные значения  $\delta$  при ВО образца, имитирующего конструкцию чугунобетонной станины металлорежущих станков (8,3 %) [14], и оболочки из титанового сплава с приваренными ребрами жесткости, а также стального вала (4,0 и 3,5 % соответственно) [15]. Во-вторых, само изменение декремента колебаний изделия в процессе ВО, например, станины машины постоянного тока 3,3 %, а также двух сварных корпусов координатно-измерительных машин [11] 4,2 и 2,8 % соответственно, в несколько раз превышает абсолютное значение декремента колебаний материала, который при напряжении, свойственном ВО, в условиях комнатной температуры для углеродистых сталей составляет 0,2...1,0 %, для титановых сплавов 0,05...0,15 %, для чугунов 2...5 % [16].

Таким образом, существующее до настоящего времени противоречие в направленности изменения декремента колебаний материала с наблюдаемым в промышленных условиях, указывает прежде всего на необоснованность контроля процесса ВО по критерию, основанному на определении интегральной характеристики рассеяния энергии в конструкции, изменение которого в процессе ВО, во-первых, не связано непосредственно с изменением остаточных напряжений, во-вторых, многократно превышает рассеяние энергии в материале. Поскольку изменения ОН происходят в материале обрабатываемого изделия, то этот процесс следует оценивать по изменению рассеяния энергии в материале.

В связи с этим цель настоящей работы состоит в оптимизации метода ВО элементов металлоконструкций и оценке ее влияния на их сопротивление усталости и установление взаимосвязи изменения рассеяния энергии в обрабатываемом элементе с кинетикой остаточных напряжений.

**Объекты исследования, испытательное оборудование.** Исследования оптимизации метода ВО проводились как в лабораторных условиях на образцах из стали 20 ( $\sigma_b = 440$  МПа,  $\sigma_T = 290$  МПа) размером 100×400×420 мм с приваренным вдоль длинной стороны образца ребром, так и в производственных условиях. Приварка ребра полуавтоматическим способом в среде углекислого газа при погружении образца на половину толщины в воду позволила создать высокие остаточные напряжения растяжения, величину и знак которых в направлении, совпадающем с направлением приложения нагрузки, определяли магнитошумовым методом, основанным на использовании эффекта Баркгаузена [17]. Эпюра ОН показала, что на границе перехода шва к основному металлу они максимальны и составили в среднем 220 МПа, т. е. 0,76 $\sigma_T$ , а на расстоянии 12 мм

уже равны нулю и далее переходят в сжимающие. В дальнейшем при анализе кинетики ОН использовалось значение максимального остаточного напряжения растяжения  $\sigma_{ост}^H$ . В производственных условиях ВО подвергались балки коробчатого сечения (далее балки) размером 190×170×2000 мм и зоны приварки концевых пятников к элементам соединительной балки восьмиосной железнодорожной цистерны из стали 09Г2С. Пятники сложной конфигурации изготовлены электрошлаковым литьем из стали 20ГФЛ ( $\sigma_b = 740$  МПа,  $\sigma_T = 590$  МПа), а балки — сваркой из листовой стали 20 толщиной 20 мм. Необходимость проведения ВО концевого пятника объясняется его частым усталостным разрушением в процессе эксплуатации.

ВО металлоконструкций осуществлялась как посредством электромеханического вибратора ИВ107 путем создания переменных напряжений на резонансных или околорезонансных частотах, так и пульсатором ЦДМ-200пу в режиме вынужденных колебаний, позволяющем проводить испытания при любой асимметрии цикла. Амплитуда напряжений измерялась тензометрическим методом.

Испытания образцов на усталость при изгибе проводились на установке ДСО-2 [18] при заданном коэффициенте асимметрии цикла напряжений  $R$  в условиях гармонического нагружения с частотой 20 Гц. Амплитуда напряжений измерялась тензометрическим методом.

Для исследований изменения рассеяния энергии в материале были выбраны образцы, вырезанные из трубы стали Ст.3 диаметром 275 мм, толщиной 8 мм в состоянии поставки. Механические характеристики при растяжении цилиндрических образцов, вырезанных из стенки трубы в тангенциальном направлении, составили:  $\sigma_{0,2} = 235$  МПа,  $\sigma_b = 450$  МПа. Кольцевой образец шириной 115 мм с разрезом закреплялся в верхней своей части в узле колебаний посредством струбцины, которая в свою очередь подвешивалась на струнах. Благодаря такой схеме закрепления исключена возможность конструкционного демпфирования. В установке реализуется резонансный принцип возбуждения изгибных колебаний образца посредством электромагнитов, закрепленных на его торцах. Циклические напряжения создавались за счет периодического сближения и удаления концов образца и рассчитывались по деформации тензорезистора, наклеенного в области действия максимального изгибающего момента. Для создания ОН на наружной поверхности по окружности посередине образца выполнялась наплавка, а внутренняя его поверхность охлаждалась проточной водой. Оценка величины и зна-

ка ОН в околошовной зоне, действующих вдоль наплавки, проводили магнитошумовым методом [17]. Значения  $\sigma_{ост}^H$  на расстоянии 2 мм от наплавки составляли в среднем 200 МПа, т. е.  $0,85\sigma_{0,2}$ , а на расстоянии 8 мм — 50 МПа. Декремент колебаний определялся методом записи виброграммы свободных затухающих колебаний образца [19] с использованием для этой цели указанного тензорезистора. Ввиду того, что при нанесении наплавки существовала опасность повреждения датчика, определение  $\delta$  дублировалось еще одним способом. Для измерения размаха колебаний образца использовалась промышленная телевизионная установка ПТУ-61. Для увеличения точности измерений телевизионная камера через специальный переходник подсоединялась к микроскопу МБС-1, закрепленному на корпусе испытательной установки. Для измерения количества циклов колебаний образца, соответствующих половинному затуханию их размаха, использовался частотомер. Декремент колебаний определялся при амплитуде напряжений цикла  $\sigma_a = 7$  МПа. Минимальная  $\sigma_a$  при ВО составляла 15, максимальная 60 МПа.

**Анализ результатов исследований.** Оптимизация метода ВО заключалась в выборе неповреждающих режимов нагружения металлоконструкций с целью снижения в них ОН без опасности возникновения усталостного повреждения. Он основан на использовании комплексной диаграммы предельных напряжений цикла (ДПНЦ) (рис. 1). По полученным пределам выносливости  $\sigma_R$  образцов с приваренным ребром из стали 20 на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружений при  $R = 0$  и  $0,7$  определялась линия предельных напряжений 1, которая ограничена пределом выносливости при симметричном цикле нагружения (на рис. не показано) и пределом прочности  $\sigma_B$ . Линии 2, 3 соответствуют экспериментально определенным пределам циклической ползучести  $\sigma_{ц.п.R}$  [20] стали 20 при растяжении и изгибе, полученным при  $R = 0,7$  и  $0,85$ , т. е. максимальным напряжениям, под действием которых на заданной базе испытаний в режиме циклической ползучести достигается заданное значение остаточной деформации  $\epsilon_{пл}$ . В данном случае  $\epsilon_{пл} = 0,2\%$ . Они ограничены пределом ползучести при статическом нагружении (допускается  $\sigma_T$ ) и пределом выносливости, названным минимальным пределом циклической ползучести  $\sigma_{ц.п}$ . Поскольку испытания образцов проводилась при изгибе, то для назначения напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_{вн}$  использовался участок ДПНЦ, полученный также в этих условиях. Перед началом ВО исходное максимальное остаточное напряжение  $\sigma_{ост}^H$ , изменяющееся в каждом образце в пределах 210...220 МПа, откладывалось на диаграмме (т. А). Напряжение от

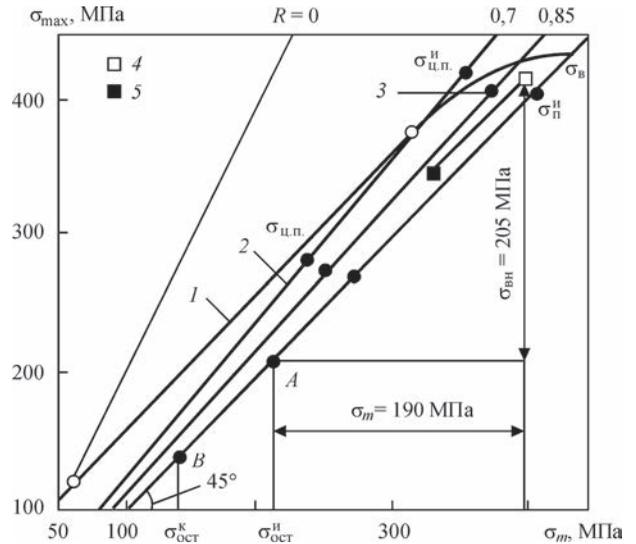


Рис. 1. Диаграмма предельных напряжений сварного соединения стали 20 (1), линии пределов циклической ползучести материала при растяжении (2) и изгибе (3), суммарные напряжения в исходном состоянии (4) и после  $10^5$  циклов нагружений (5)

внешней нагрузки, которое необходимо приложить к образцу, определяется из условия

$$\sigma_{ц.п.R} < \sigma_{вн} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R,$$

где  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{ц.п.R}$  — напряжения, соответствующие точкам пересечения действия циклических напряжений с линиями предельных напряжений 1 и 3 соответственно. Условие  $\sigma_{вн} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R$  обеспечивает отсутствие усталостных повреждений после ВО, а  $\sigma_{ц.п.R} < \sigma_{вн} + \sigma_{ост}^H$  — эффективное снижение ОН. Согласно методике  $\sigma_{вн}$  следует рассчитать так, чтобы максимальные напряжения находились ниже линии 1, но выше линии 3, что обеспечит отсутствие усталостных повреждений, но эффективное снижения ОН. Если бы  $\sigma_{ост}^H$  было больше среднего напряжения, соответствующего  $\sigma_{ц.п}$ , то для снижения ОН достаточно приложить симметричную циклическую нагрузку. Поскольку в данном случае такого не наблюдается, то для снижения ОН необходимо приложить асимметричную нагрузку, оставаясь в безопасной области нагружения. При значении  $\sigma_{ост}^H = 215$  МПа рассчитывались параметры внешней нагрузки (их значения представлены на рис. и в табл. 1). Продолжительность ВО составляла  $10^5$  циклов нагружения. В течение этого времени режимы нагружения поддерживались постоянными. Видно, что после ВО снижение произошло более, чем на 40 % (на рис. затемненный квадрат) и оно составило в среднем  $0,45\sigma_T$  стали 20 (т. В). Для оценки влияния низких ОН были проведены сравнительные усталостные испытания. Анализ полученных результатов при нулевом цикле нагружения в условиях комнатной температуры (рис. 2) свидетельствует об увеличении долговечности виброобработанных образцов во всем диапазоне приложения напряжений (кривая 2). Для сравнения на

Таблица 1. Результаты снижения максимальных остаточных напряжений растяжения в зависимости от вида используемого оборудования при ВО

Объекты исследований	Оборудование	Значения напряжений при неповреждающих режимах обработки для снижения ОН в сварных конструкциях, МПа							
		$\sigma_{ост}^И$	$\sigma_R$	$\sigma_{ц.п.Р}$	$\sigma_{вн}$		$\sigma_{max}$	$\sigma_{ост}^К$	$\sigma_{ост}^К / \sigma_{ост}^И, \%$
					амплитуда	статистическое			
Балка	Вибратор	245	290	275	40	0	285	190	78
		230	330	265	20	70	320	155	67
	Пульсатор	230	330	265	22	70	322	150	65
		200	320	265	28	88	316	145	72
		175	315	265	24	109	308	120	69
Пятник	Вибратор	480	530	515	35	0	515	385	80
Образец	ДСО-2	215	430	405	15	190	420	125	58
Балка	Термообработка	240	-	-	-	-	-	100	42
Пятник	Термообработка	480	-	-	-	-	-	210	44

рисунке приведена кривая усталости *1* образцов с высокими ОН, полученная в исходном состоянии. Видно, что с понижением нагрузки их действие проявляется в большей мере, вследствие чего кривые усталости расходятся. Например, при снижении напряжений от 180 МПа до напряжения на уровне предела выносливости, равного 100 МПа, долговечность виброобработанных образцов увеличивается от 1,5 до 2,7 раза. При этом предел выносливости, определенный на базе  $5 \cdot 10^6$  циклов нагружений, повысился на 40 %. ВО балок и пятников проводилась посредством электромеханического вибратора ИВ107 на околорезонансной частоте продолжительностью примерно 20 мин, что соответствовало  $10^5$  циклам нагружений. О снижении остаточных напряжений до  $\sigma_{ост}^К$  судили по изменению тока, потребляемого вибратором. Амплитуды напряжений определялись исходя из приведенного выше условия, а значения  $\sigma_{ц.п.Р}$  при  $\epsilon_{пл} = 0,2 \%$ . Результаты испытаний приведены в табл. 1. Анализ результатов показал, что при максимально достигнутой амплитуде напряжений  $\sigma_a$

технология ВО позволила снизить исходные ОН на 20...22 %, которые составили, в среднем,  $0,65\sigma_T$  соответствующей стали. В некоторых балках ОН были таковы, что для их снижения требовалась амплитуда напряжений, превосходящая линию *1* (см. рис. 1). В этих случаях использовалось асимметричное циклическое нагружение пульсатором ЦДМ-200пу в режиме вынужденных колебаний с частотой 10 Гц. Асимметричное нагружение позволяет значительно расширить возможности ВО за счет увеличения напряжений от внешней нагрузки, значения которых приведены в табл. 1, оставляя их в безопасной области. Видно, что обработка в этом случае снизила исходные ОН в среднем на 32 %, которые составили  $0,5\sigma_T$ . В качестве сравнения отметим, что значения ОН в балках и пятниках после термообработки составили в среднем  $0,35\sigma_T$ .

Таким образом, проведенные испытания показали, что для увеличения долговечности и сопротивления усталости неотвественных конструкций ВО вполне может конкурировать с отжигом, особенно если учесть высокую стоимость и продолжительность технологического цикла последнего.

При ВО исследовалось также влияние амплитуды напряжений цикла и времени на изменение ОН в кольцевых образцах и их декремента колебаний. Конструкция образца и схема его нагружения позволили определять не только изменение декремента колебаний в материале, но и его геометрическую стабильность. Эпюры распределения ОН по ширине образца через разное количество циклов нагружения показали, что наиболее интенсивно уменьшаются максимальные ОН, а на расстоянии 6 мм от шва, где исходные ОН равны примерно  $0,5\sigma_{0,2}$ , их изменение не наблюдалось. Результаты относительного изменения декремента и максимального ОН приведены на рис. 3, где  $\delta^И$  и  $\sigma_{ост}^И$  — декремент колебаний и остаточное напряжение в исходном состоянии, а  $\delta$ ,  $\sigma_{ост}$  — их те-

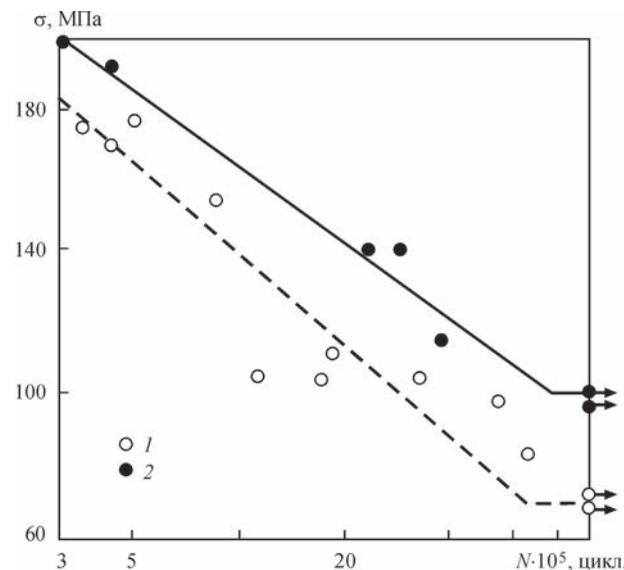


Рис. 2. Кривые усталости сварного соединения в исходном состоянии (1) и после ВО (2) ( $R = 0$ )

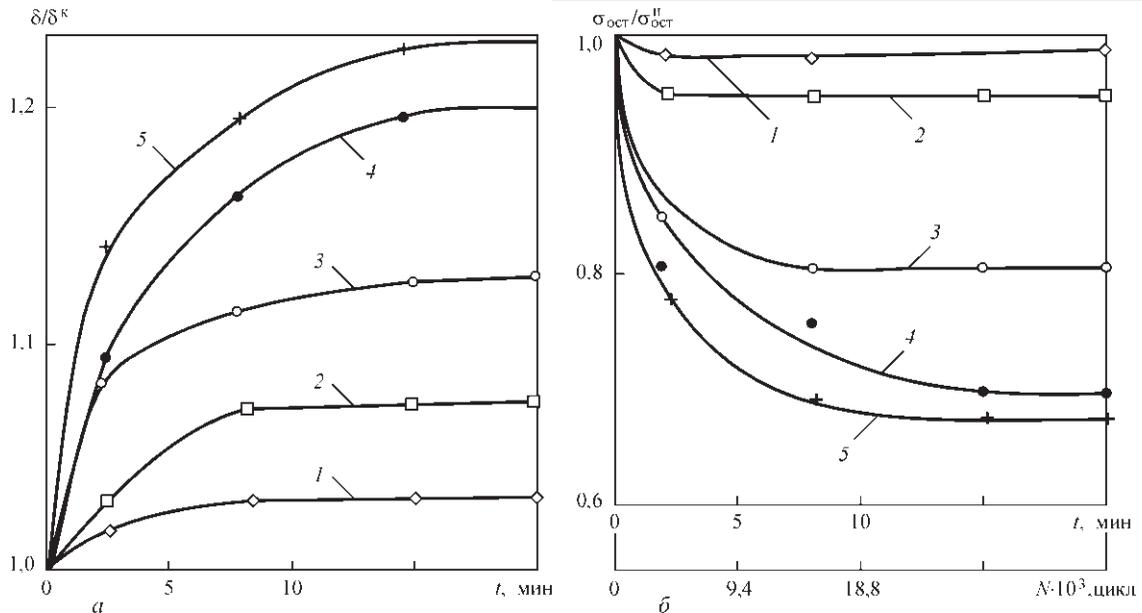


Рис. 3. Зависимость относительного изменения декремента колебаний (а) и максимального остаточного напряжения (б) от времени ВО при разных максимальных напряжениях цикла  $\sigma_{max}$ : 1 — 185 МПа ( $\sigma_a = 15$  МПа); 2 — 205 МПа (15 МПа); 3 — 230 МПа (50 МПа); 4 — 235 МПа (30 МПа); 5 — 265 МПа (60 МПа)

кущие значения в процессе ВО. Значения  $\delta^II$  при  $\sigma_a = 7$  МПа и  $\sigma_{ост}^II$  для каждого испытуемого образца приведены в табл. 2.

Полученные результаты свидетельствует о том, что при циклическом нагружении образцов происходит одновременное уменьшение ОН и увеличение декремента колебаний, что может быть следствием пластического деформирования материала [12]. О том, что в образцах протекает пластическая деформация свидетельствуют данные об относительном изменении декремента колебаний  $\delta/\delta^k$  с течением времени после ВО образцов при разных максимальных напряжениях цикла (рис. 4), где  $\delta$  — текущее значение декремента,  $\delta^k$  — конечное значение декремента по завершении ВО (определен по кривым, приведенным на рис. 3). Представленные графики (рис. 4) показывают, что с течением времени во всех образцах декремент колебаний уменьшается, что свидетельствует о протекании в материале образцов после ВО процесса деформационного старения, который возникает только в результате пластического деформирования материала [21]. Чем на большую величину увеличивался декремент при ВО, тем большее его снижение наблюдалось во времени.

Таблица 2. Исходные значения декремента колебаний материала и максимального остаточного напряжения растяжения

Номер образца	$\sigma_{ост}^II$ , МПа	$\delta^II$ , %
1	170	0,107
2	180	0,112
3	190	0,12
4	205	0,111
5	205	0,13

Через 1000...1500 ч, в зависимости от максимальных напряжений цикла, его значение практически стабилизировалось.

Известно влияние статических напряжений на декремент колебаний образцов [16]. Можно ожидать аналогичного влияния остаточных напряжений. Чтобы оценить изменение декремента только за счет уменьшения остаточных напряжений, воспользовались литературными данными [22], где показано, что в образцах из низкоуглеродистой стали изменение статической составляющей от 150 до 100 МПа при амплитуде изгибных напряжений 60 МПа приводит к относительному увеличению декремента колебаний примерно на 3 %. Результаты испытаний образцов из стали 45 [23] вообще не показали изменения декремента при снижении статического напряжения от 250 до 150 МПа. При такой же амплитуде напряжений относитель-

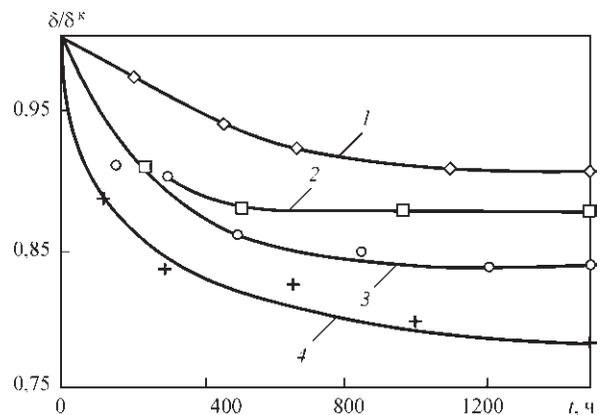


Рис. 4. Относительное изменение декремента колебаний с течением времени после ВО образцов при разных максимальных напряжениях цикла  $\sigma_{max}$ : 1 — 185 МПа ( $\sigma_a = 15$  МПа); 2 — 205 МПа (15 МПа); 3 — 230 МПа (50 МПа); 4 — 265 МПа (60 МПа)

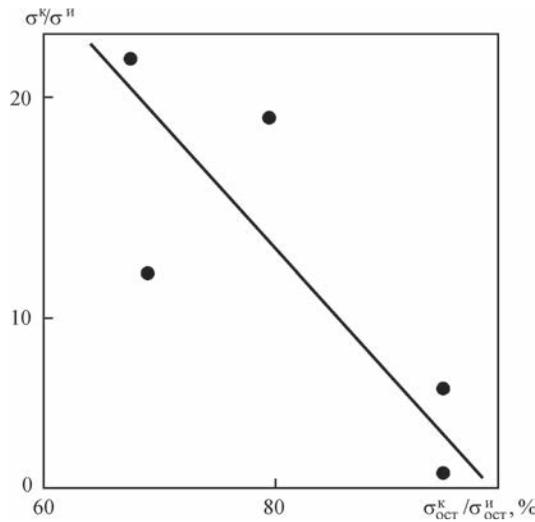


Рис. 5. Зависимость относительного изменения декремента колебаний  $\delta^k$  от относительного изменения остаточного напряжения  $\sigma_{ост}^k$ , определенного в конце ВО при разных режимах циклического нагружения

ное увеличение  $\delta$  кольцевого образца в конце ВО составило 1,22, т. е. 22 % (см. рис. 3). Очевидно, что главной причиной изменения декремента колебаний материала кольцевых образцов явилось их пластическое деформирование при циклическом нагружении. Измерения ОН в образцах через разное время после ВО не показали их изменения. По мере увеличения максимальных напряжений цикла, равных  $\sigma_{max} = \sigma_{ост}^н + \sigma_a$ , увеличение декремента колебаний и снижение ОН проявляется в большей степени (см.рис. 3). Наиболее интенсивное уменьшение ОН и увеличение  $\delta$  наблюдается в течение 5...10 мин, что соответствует  $(9,4...18,8) \cdot 10^3$  циклов нагружения. Причем чем меньше максимальное напряжение, тем за меньшее время наступают в образце стабилизационные процессы. Дальнейшее увеличение времени ВО практически не влияет на ОН и  $\delta$ . Анализ литературных данных [24] также подтверждает полученный результат о влиянии количества циклов нагружения при ВО на снижение ОН. Заслуживает внимания также тот факт, что стабилизация декремента колебаний и ОН по количеству циклов практически совпадает. Следовательно, по изменению и последующей стабилизации  $\delta$  можно судить о процессе снижения и последующей стабилизации ОН в обрабатываемом изделии, а следовательно, и о времени, необходимом для его ВО. Поскольку, согласно данным рисунка, при амплитудах напряжений от 15 МПа и выше имеет место изменение и последующая стабилизация процессов, происходящих в материале образца, то, видимо, только по характеру изменения  $\delta$ , не располагая его численным значением, нельзя судить об эффективности ВО с точки зрения количественного снижения остаточных напряжений.

Количественная связь относительного изменения декремента колебаний и ОН, определенных после 20 мин ВО образцов при разной амплитуде напряжений, приведена на рис. 5, где конечные значения декремента колебаний и ОН определены по данным рис. 3. Несмотря на то, что максимальные напряжения цикла при ВО большинства образцов были меньше предела текучести, наблюдалось снижение ОН. ВО при наиболее интенсивном в эксперименте режиме нагружения ( $\sigma_a = 60$  МПа) привела к относительному увеличению декремента колебаний на 22 % и снизила исходные ОН (205 МПа) на 32 %. В абсолютном значении уменьшению исходных ОН на 65 МПа соответствует увеличение декремента колебаний материала  $\Delta\delta = \delta^k - \delta^н$  всего на 0,024 %. Наличие такого графика может быть полезным при нахождении оптимального режима ВО. Полученные экспериментальные результаты показали, что при таком малом значении декремента колебаний материала, а тем более при еще меньшем его изменении в процессе снижения ОН в материале, оценивать эффективность ВО по критерию общего рассеяния энергии в конструкции, если не будет учитываться конструкционное рассеяние энергии, невозможно.

Чтобы оценить эффективность ВО были проведены наблюдения за относительным изменением декремента колебаний и ОН в образце через разное время после создания продольной наплавки при условии, что ВО образец не подвергался. Анализ результатов, приведенных на рис. 6, показал, что до 150 ч также, как и в образцах, подвергавшихся ВО,  $\delta$  увеличивается, а ОН уменьшаются. Причем момент стабилизации исследуемых характеристик по времени совпадает. Затем в результате процесса деформационного старения декремент колебаний уменьшается практически до исходной величины, а ОН остается неизменным. Уменьшение  $\delta$  свидетельствует о том, что даже при отсутствии ВО только за счет действия высокого ОН в образце протекает пластическая деформация, что приводит к снижению исходного ОН. Сравнивая экспериментальные данные на рис. 3 и 6, можно отметить, что, несмотря на одинаковый характер изменения декремента колебаний и ОН, стабилизационный процесс при естественном старении наступает через более длительный срок (в данном случае через 150 ч). Из этого следует важный практический вывод о том, что ВО значительно ускоряет (в 450 раз) процесс снижения ОН в сварных конструкциях. Поэтому в более ранних работах [25] термин «виброобработка» употреблялся как «вибростарение».

Поскольку задачей ВО, в том числе, является предотвращение коробления элементов конструк-

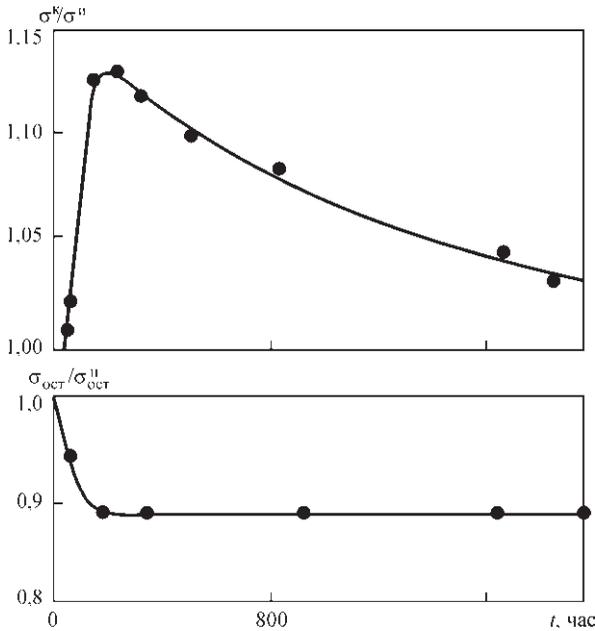


Рис. 6. Зависимость относительного изменения декремента колебаний и максимального ОН от времени в образце, не подвергнутому ВО

ций при хранении или эксплуатации, то в данной работе также исследовалось влияние амплитуды напряжений на изменение линейного размера кольцевого образца, который выражался в изменении зазора  $\Delta$  между его свободными концами как в течение ВО, так и после нее. Полученные результаты показали, что преимущественное уменьшение зазора происходит в течение  $7,5 \cdot 10^3$  циклов нагружения и после  $15 \cdot 10^3$  циклов нагружения он

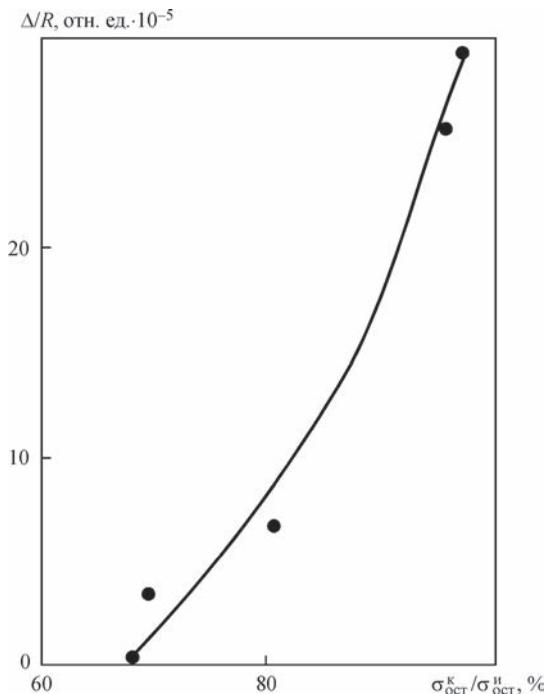


Рис. 7. Зависимость изменения относительного зазора в кольцевых образцах от относительного изменения ОН, определенных через 1500 ч вылеживания после виброобработки при разной амплитуде напряжений цикла ( $\sigma_a = 15, 15, 30, 50, 60$  МПа).  $R$  — радиус кольцевого элемента

не изменяется независимо от величины  $\sigma_a$  (на рис. не показано). Также можно отметить, что по мере увеличения прикладываемой амплитуды  $\sigma_a$  величина последующего после ВО коробления образца уменьшается, а при  $\sigma_a = 60$  МПа изменения зазора в процессе вылеживания образца в течение 1500 ч не наблюдалось. Оценку изменения относительного зазора в кольцевых образцах от относительного изменения ОН, определенных через 1500 ч после ВО, дает зависимость, представленная на рис. 7. Большой величине снижения остаточных напряжений соответствует меньшее изменение зазора после ВО. Установлено, что при снижении исходного ОН на 32 %, что соответствует  $0,51\sigma_{0,2}$  исследуемого материала, изменения зазора в образце не наблюдалось. Результаты испытаний показали, до какого уровня в данном случае следует снижать ОН, чтобы добиться геометрической стабильности исследуемого элемента.

### Выводы

1. На основе комплексной диаграммы предельных напряжений цикла разработан и экспериментально апробирован метод выбора неповреждающих режимов виброобработки сварных элементов металлоконструкций, обеспечивающих эффективное снижение в них остаточных напряжений и повышение пределов выносливости.

2. Установлено, что уменьшение при виброобработке остаточных напряжений приводит к увеличению демпфирующей способности материала изделия. С ростом максимальных напряжений цикла повышение декремента колебаний происходит на большую величину, а его стабилизация и стабилизация остаточного напряжения по времени совпадают. Это позволяет судить об окончании процесса по началу стабилизации декремента колебаний.

3. Уменьшение декремента колебаний после ВО свидетельствует о протекании в материале процесса деформационного старения, указывающего на пластическое деформирование образцов при виброобработке, в результате чего происходит снижение остаточных напряжений.

4. Виброобработка также обеспечивает геометрическую стабильность сварных элементов. Установлено, что снижение исходных максимальных остаточных напряжений растяжения до  $0,51$  предела текучести материала приводит к геометрической стабилизации кольцевого образца.

1. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — К: Наукова думка, 1978. — 193 с.
2. Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 271 с.
3. Шпеер Ф. З., Панов В. И. Вибрационная обработка сварных крупногабаритных конструкций с целью уменьше-

- ния деформации и склонности к образованию трещин // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 13–15.
4. Эффективность методов снижения остаточных сварочных напряжений / А. Я. Недосека и др. // Автоматическая сварка. – 1974. – № 3. – С. 66–69.
  5. Dreger D. R. Good vibes reduce stresses in metall parts // Machine Design. – 1978. – V. 50, № 13. – P. 100–103.
  6. Зимницкий Ю. А., Хвалынский В. Н. Экспериментальная проверка влияния низкочастотной виброобработки на эксплуатационную надежность корпусных конструкций // Судостроение. – 2004. – № 1. – С. 50–52.
  7. Сутырин Г. В. Снижение остаточных напряжений в сварных соединениях низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. – 1983. – № 2. – С. 22–23.
  8. Зубченко О. И., Грузд А. А., Орехов Г. Т. Применение вибрационного нагружения для снятия остаточных напряжений в сварных рамах // Автоматическая сварка. – 1974. – № 9. – С. 64–66.
  9. Галяш А. А., Козин М. Ю., Коломеец Н. П. Применение низкочастотной вибрационной обработки для стабилизации размеров сварных и литых изделий машиностроения // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 30–32.
  10. Пат. США № 3622404. Способ и устройство для снятия напряжений в детали путем вибрации / Л. Томпсон. – Оpubл. 23.11.1971.
  11. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных корпусных деталей электрических машин и гидрогенераторов // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 23–25.
  12. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – К.: Наукова думка, 1971. – 375 с.
  13. Ряхин В. А., Мошкарев Г. Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. – М: Машиностроение, 1984. – 230 с.
  14. Адоян Г. А., Алдошин Ю. С., Герчиков А. М. Вибростарение чугуновых деталей металлорежущих станков // Литейное производство. – 1979. – № 11. – С. 24–25.
  15. Галяш А. А., Васильченко К. И., Чернецов Г. П. Определение частоты нагружения при низкочастотной виброобработке сварных конструкций // Сварочное производство. – 1992. – № 8. – С. 35–36.
  16. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. – К: Наукова думка, 1985. – 264 с.
  17. Гришаков С. В., Ковалев А. И. Использование эффекта Баркгаузена для оценки напряжений и повреждений в ферромагнитных материалах // АН УССР. – Институт проблем прочности. – Препринт. – Киев, 1988. – 48 с.
  18. Дегтярев В. А. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла // Проблемы прочности. – 1982. – № 10. – С. 110–113.
  19. Яковлев А. П. Диссипативные свойства неоднородных материалов и систем. – К: Наукова думка, 1985. – 248 с.
  20. Дегтярев В. А. Влияние коэффициента асимметрии цикла напряжений на усталость и циклическую ползучесть низколегированных сталей. Сообщ. 2 // Проблемы прочности. – 1991. – № 2. – С. 27–31.
  21. Влияние упрочнения и охрупчивания на рассеяние энергии при деформационном старении корпусных сталей для АЭС / А. А. Астафьев и др. // Там же. – 1977. – № 10. – С. 94–102.
  22. Писаренко Г. С., Хильчевский В. В., Гончаров Т. И. Исследование рассеяния энергии в материале при изгибных колебаниях в поле статических нормальных напряжений // Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. – К.: Наукова думка, 1968. – С. 276–281.
  23. Писаренко Г. С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. – К.: Изд-во АН Украинской ССР, 1962. – 436 с.
  24. Снижение виброобработкой остаточных напряжений в сварных элементах / Е. П. Оленин и др. // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 11–13.
  25. Рагульскис К. М., Стульпинас Б. Б., Толутис К. Б. Вибрационное старение. Сер. Вибрационная техника. – Л.: Машиностроение, 1987. – Вып. 9. – 68 с.

В. О. Дегтярьов

Институт проблем міцності  
ім. Г. С. Писаренка НАН України.  
01014, м. Київ-14, вул. Тимирязєвська, 2.  
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

ВПЛИВ ВІБРООБРОБКИ НА ОПІР ВТОМІ  
ТА ДЕМПФУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ КОНСТРУКТИВНИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ З ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

У роботі на основі комплексної діаграми граничних напружень циклу запропоновано метод вибору непошкоджуючих режимів віброобробки елементів металоконструкцій з метою ефективного зниження в них залишкової напруженості без небезпеки руйнування від втоми на стадії технологічної обробки. Даний метод перевірено на прикладі випробувань конструктивних елементів зі сталі 20 та кінцевого п'ятника зі сталі 20ГФЛ з'єднуючої балки восьминової залізничної цистерни. Порівняльні випробування втоми показали збільшення довговічності оброблених зварних зразків в 2,5 рази і підвищення їх межі витривалості на 40 %. В процесі віброобробки кільцевого елемента зі сталі Ст.3 зменшення залишкових напружень супроводжується збільшенням його демпфувальної здатності. З ростом максимальних напружень циклу підвищення декремента коливань відбувається на значну величину, а його стабілізація за часом збігається із стабілізацією залишкового напруження. Це дозволить судити про закінчення процесу зміни та подальшої стабілізації декремента коливань. Встановлене зменшення демпфувальної здатності досліджуваного зразка після віброобробки свідчить про його деформаційне старіння, що вказує на пластичне формування в ході обробки. З підвищенням амплітуди напружень циклу зменшується деформація зразка при подальшому після віброобробки вилежуванні до 1500 год, а зниження вихідних залишкових напружень розтягування до 0,51 межі текучості матеріалу призводить до його геометричної стабільності. Бібліогр. 25, табл. 2, рис. 7.

*Ключові слова:* віброобробка, зварне з'єднання, залишкові напруження, межа витривалості, амплітуда напружень циклу, межа циклічної повзучості, декремент коливань

Поступила в редакцію 07.12.2016