

УДК 621.789.982.9

А.В. КОЛОТ, д-р техн. наук, В.А. КОЛОТ, канд. техн. наук (ЗАО «МИНЭТЭК»), А.Н. ТКАЧЕНКО, инж., В.П. ГУНДАРЬ, инж. (ОАО ХК «Лугансктепловоз»)

Исследование влияния энергосберегающего вибродеформационного старения на усталостную выносливость ответственных деталей локомотивов

Ключевые слова: вибродеформационное старение, резонансное воздействие, усталостная выносливость, боковины тележек, локомотив 2ТЭ 116.

Введение. Надежность и эффективность функционирования деталей машин и механизмов в значительной мере определяется наличием в них уровня и степени стабильности остаточных напряжений. Остаточные напряжения бывают такие, что вызывают растяжение и сжатие. Если напряжения сжатия служат как резерв повышения прочности, то напряжения растяжения её снижают.

С точки зрения физической сущности — остаточные напряжения — это напряжения, обусловленные неустойчивым равновесием электромагнитных внутренних сил взаимодействия в материалах, в случае, когда какое-либо воздействие отсутствует [1]. К электромагнитному взаимодействию сводится большинство сил, проявляющихся в макроскопических явлениях, в частности силы упругости. Подобно тому, как изменение магнитного поля выступает в роли источника ЭДС, остаточные напряжения служат потенциальными носителями пластической деформации кристаллического тела, а их изменение вызывает необратимое изменение его формы. Используя способы воздействия на силы упругости, можно изменять электромагнитные силы, а следовательно, и остаточные напряжения. Такие способы хорошо известны и широко используются в производстве. Они основаны на действии температурных и силовых полей и ставят своей целью обеспечение стабильного равновесия остаточных напряжений.

Методы воздействий на остаточные напряжения можно подразделить в зависимости от того, какой фактор

является доминирующим на: метод термопластического воздействия и метод механопластического воздействия.

Особое место среди известных методов занимает (в силу физического механизма релаксации, перераспределения остаточных напряжений) ускоренное деформационное старение под воздействием резонансных колебаний.

Однако на практике применение этой технологии, несмотря на явные преимущества (энергосбережение, простота реализации, незначительное технологическое время выполнения) сдерживается, особенно для ответственных металлоконструкций.

Как известно в большинстве случаев сварка приводит к возникновению в сварных соединениях и в околошовной зоне растягивающих остаточных напряжений. А это в сочетании с наложенными временными напряжениями от вибрации не исключает вероятность проявления скрытых дефектов в концентраторах напряжений в виде разрушения конструкции.

В подвижном железнодорожном транспорте широко используются ответственные сварные изделия, работающие в условиях циклического нагружения. К ним относятся рамы тележек вагонов и локомотивов и их элементы-боковины.

Поэтому повышение усталостной выносливости на основе установления рациональных режимов и оптимизации технологии вибродеформационного старения для подобных металлоконструкций является задачей актуальной.

Анализ основных исследований и публикаций. Наличие структурных образований типа зёрен, микротрещин, дислокаций и т.д. во всех материалах, которые встречаются на практике, приводит к тому, что их прочность оказывается на два-три порядка меньше теоретической [2]. При этом, чем больше дефектность материала, отклонение его структуры от идеального порядка тем меньше прочность при прочих равных условиях [3]

В литературных источниках отсутствует однозначное мнение относительно практического использования вибродеформационного старения для металлоконструкций, работающих в условиях циклических нагрузок. Часть авторов [3,4,5] считают, что виброобработка приводит к снижению циклической долговечности на несколько процентов. Однако, в то же время, виброобработка снижает, как известно, пиковые напряжения, которые негативно влияют на циклическую выносливость, следовательно имеет место её повышение [6], которому способствует в том числе и стабилизация фазоструктурных составляющих.

В работе [7] сформулировано два условия максимальной долговечности.

Условие 1:

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{ц}} \leq \sigma_T^u, \quad (1)$$

где σ_0 — остаточные напряжения; $\sigma_{\text{ц}}$ — циклические напряжения при эксплуатации; σ_T^u — циклический предел текучести.

Снижение остаточных напряжений (пиковых значений) до уровня, при котором выполняется условие (1) является достаточным для обеспечения циклической выносливости.

Условие 2:

$$\sigma_0 + \sigma_u \leq \sigma_R, \quad (2)$$

где σ_R — предел усталостной прочности.

Данное условие считается допустимым, и если усталостные трещины возникнут, то вероятность их развития будет минимальной.

Согласно [1] основной механизм стабилизации остаточных напряжений — внутреннее трение на границе зёрен в узлах кристаллической решётки при изменении внутренних электромагнитных сил в процессе механического воздействия на резонансных частотах.

Механическая энергия вынужденных колебаний демпфируется за счёт внутреннего трения. При этом в местах, где остаточные напряжения имеют большие (пиковые) значения, в так называемых микро концентраторах напряжений, происходит большее демпфирование. Этого бывает достаточно для обеспечения движения дислокаций и выравнивания искривления кристаллической решётки по минимуму энергии деформации. В результате этого происходит сглаживание пиковых значений остаточных напряжений.

Цель работы. Выполнить анализ процесса резонансного воздействия на боковины тележек с использованием виброустановки ВСОН 2100М конструкции ЗАО «МИ-НЭТЭК». Провести исследования колебательной системы (вибровозбудитель — обрабатываемое изделие). Установить причины, влияющие на снижение усталостной выносливости ответственных металлоконструкций.

Решение задачи. Для решения поставленной задачи принята гипотеза об абсолютно упругом теле, идеальной пластичности и о Ньютоновой вязкости материала, предполагающая возникновения эффекта «взаимодействия».

Исследование модели обобщенной линейной среды позволили представить её в виде математической зависимости равенства движения кристаллической решётки под воздействием гармонических колебаний.

$$\xi = \xi_b e^{i\phi}, \quad (3)$$

где

$$\xi_b = \frac{\omega^2 m r}{2\pi^2 \left[(k_1 - M\omega^2)^2 + \omega^2 t_0^2 \left(k_1 \frac{t_1}{t_0} M\omega^2 \right)^{1/2} \right]},$$

$$\phi = \arctg \frac{\omega t_0 \left(k_1 \frac{t_1}{t_0} - M\omega^2 \right)}{(k_1 - M\omega^2)},$$

где ω — частота колебаний системы; m — неуравновешенная масса эксцентрика вибровозбудителя; r — величина смещения центра массы; M — приведенная масса системы; k_1, k_2 — жесткость системы соответственно до деформирования и после; t_0, t_1 — время релаксации остаточных напряжений при постоянной деформации и при постоянных напряжениях; ϕ — угол отставания деформации от напряжений в колебательной системе (отображает величину внутреннего трения); η — коэффициент демпфирования; ξ_b — максимальная деформация в системе под действием вибрации; ξ — величина деформации.

Анализ данной математической модели описывает поведение системы, которая позволяет учесть суммарное

влияние жесткости и коэффициента демпфирования и подтвердить допущение о том, что стабилизация остаточных напряжений (при их перераспределении, релаксации) проявляется при сдвиге фаз ϕ , то есть при возникновении внутреннего трения и снижения амплитуды колебаний, а так же изменения коэффициента демпфирования.

Поскольку процесс виброобработки, как видно, сопровождается изменением во времени параметров незамкнутой колебательной системы (вибровозбудитель — обрабатываемое изделие) то используемую технологическую систему в ней, логично отнести к классу параметрических осцилляторов.

Параметрические колебания таких систем могут сопровождаться возбуждением параметрического резонанса а, следовательно, нежелательным увеличением амплитуды колебаний.

Параметрический резонанс происходит в окрестности частот свободных колебаний $\omega = \omega_0$ и ее удвоенного значения $\omega \pm i = 2\omega_0$

$$\omega_0 - i < \omega < (\omega_0 + i).$$

Для случая

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 [1 + A \cos(\omega t)] x = 0,$$

где A — амплитуда колебаний.

Известно, что параметрический резонанс имеет место, когда

$$\omega = \frac{2\omega_0}{n}, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Отсюда очевидно, что главный параметрический резонанс происходит при удвоенной частоте собственных колебаний обрабатываемого изделия, а ширина резонанса равна $A \omega_0$.

Наличие внутреннего трения учитывается известной зависимостью

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 3v \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 [1 + A \cos(\omega t)] x = 0$$

$$\text{при } A > \frac{4\eta}{\omega^2 - v^2} < 1.$$

Следовательно, резкие возрастания амплитуды могут свидетельствовать о происходящих нежелательных процессах при виброобработке металлоконструкций. Предположительно это может быть результатом проявления дефектов в материале (раковины, трещины, неметаллические включения, неоднородность материала и др.)

Данный вывод служит основой для включения этого параметра в качестве оценочного при анализе качества обрабатываемого изделия и контроля процесса вибродеформационного старения по спектру дрейфа амплитуды начальных фаз.

Оценку влияния количества циклов виброобработки на изменение усталостной выносливости металлоконструкции выполним с учетом нормы ГОСТ 25.504, который устанавливает предел выносливости для заданной вероятности разрушения на базе 10^7 циклов.

Виброобработка осуществляется в диапазоне частот 15—100 Гц. Предположительное время обработки составляет 15 мин. При максимальной частоте вибрации 100 Гц, получим количество циклов детали менее 1% от базового до разрушения.

Рассмотрим условие долговечности изделия, подвергнутого виброобработке в режиме резонанса.

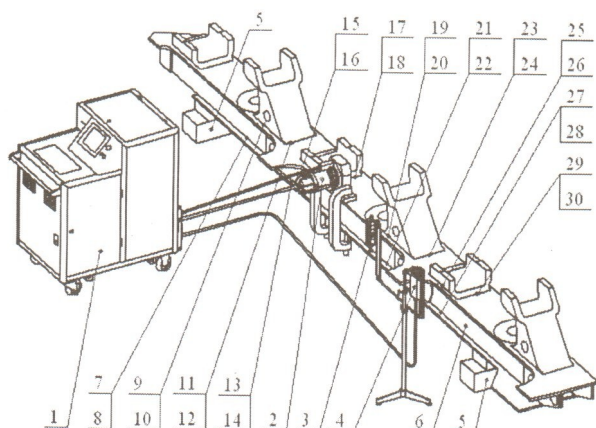


Рис. 1. Схема виброобработки боковины и расположение мест контроля сварных швов: 1 — виброустановка, 2 — вибратор, 3 — датчики, 4 — контроллер датчиков, 5 — вибропоры, 6 — боковина рамы тележки локомотива, 7 — 30 места контроля сварных швов.

$$\sigma_0 + \sigma_0^b + \sigma_u \leq \sigma_R,$$

где σ_0^b — временные напряжения, возникающее в процессе виброобработки.

В данном случае максимальная долговечность будет достигнута при условии

$$\sigma_0 + \sigma_0^b = 0.$$

Однако этого достичь невозможно. В то же время, необходимо чтобы выполнялось условие

$$\sigma_0 > \sigma_0^b + \sigma_u,$$

где σ_u — остаточные напряжения после виброобработки.

Отсюда следует вывод: необходимо устанавливать ограничения при выборе возмущающего усилия для осуществления вибродеформационного старения.

Методика выполнения исследований. Программой проведения исследований предусматривалось осуществление вибродеформационного старения семи боковин (черт. № 2 4ТЭ116. 30. 45. 36) по технологии, изложенной в руководстве по эксплуатации ВСН 03-00-000 РЭ на виброустановку ВСОН 2100 М. Технология включала следующие операции: маркировку всех боковин; визуальный контроль боковин на предмет выявления видимых дефектов; контроль сварных швов на выявление в них дефектов с использованием дефектоскопа УД4-76 до виброобработки и после виброобработки; виброобработку боковины в последовательности согласно разработан-

ных шести схем установки вибратора на боковине, датчиков относительно положения вибратора на боковине (для определения мест расположения стоячих волн) и вибропор относительно детали и положения вибратора; выбор оптимальной схемы обработки и режимов; обработку боковины на оптимальных режимах.

Заключительным этапом работы было проведение испытаний боковин на усталостную выносливость по методике ОАО ХК «Лугансктепловоз» и принятие решения.

Для испытания на усталостную выносливость были отобраны четыре боковины (№№ 1, 3, 5, 7).

Резонансные пики на всех боковинах, за исключением первой, у которой наблюдался резонансный пик на частоте 60 Гц, были в пределах 46 Гц (рис. 2).

Первая боковина обрабатывалась на первом резонансном пике (46 Гц) в течение 30 мин с возмущающим усилием ($P=1233$ Н) (см. рис. 2, б) и на втором резонансном пике (60 Гц) в течение 30 мин ($P=2100$ Н). Время обработки определялось автоматически по достижении стабильности (неизменяемости АЧХ). Необходимо отметить, что эта боковина имела вид АЧХ с широким спектром амплитуд, причем в процессе обработки наблюдались резкие изменения амплитуды и значительный ее дрейф. Это подтверждает сделанное выше заключение о происходящих явлениях параметрического резонанса. Такой же эффект наблюдался и при обработке других боковин с обнаруженными в последствии дефектами.

Третья боковина была обработана на частоте 46 Гц в течение 5 мин ($P=1020$ Н) и такое же время с $P=1233$ Н.

Пятая боковина была обработана в течение пяти минут на частоте 46 Гц с $P=1233$ Н (см. рис. 3, б) и с промежуточным интервалом пять минут на резонансной частоте 60 Гц с $P=1020$ Н.

Седьмая боковина подверглась обработке на частоте 46 Гц в течение 5 мин с $P=1233$ Н. После этого спустя две недели была проведена повторная обработка на тех же режимах дважды в течение 5 мин. Изменений АЧХ не наблюдалось.

Таким образом, боковина №1 подверглась воздействию на двух резонансных режимах 60 мин., боковина № 3 — 10 мин на двух резонансных режимах от меньшего воздействия — 5 мин., к большему — 5 мин., а боковина № 5 была обработана 10 мин. (от большего вибровоздействия — 5 мин. к меньшему — 5 мин.), боковина № 7 — 15 мин. на одной резонансной частоте.

Испытания на усталостную выносливость. Боковина устанавливалась на специальном испытательном стенде, и производилось трехкратное статическое нагружение силой $P_{ст}=10,48$ т, при этом получаемый изгибающий момент равнялся эксплуатационному от веса кузова с оборудованием. С помощью вибратора направленного действия боковина нагружалась циклической силой P_c , создающей динамический изгибающий момент. При этом по показаниям тензорезисторов, выбирался необходимый режим на каждом этапе. Боковина нагружалась 10^7 циклами нагружений, в случае ее не разрушения, начинался новый режим, при этом циклическая нагрузка повышалась на 10–15 % при неизменной величине статической нагрузки.

Боковина № 1 выдержала два режима нагружения по 10^7 без разрушения. Усталостные трещины возникли при третьем режиме нагружения на $7,18 \times 10^6$ цикле т.е. $2,72 \times 10^7$. Необходимо отметить, что в этой боковине были исправлены сварные швы в криволинейных участ-

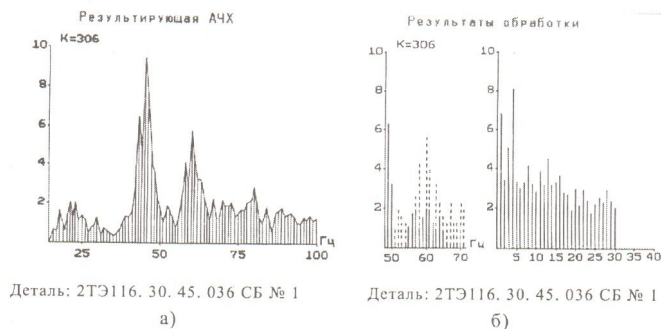


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики детали №1: а) результирующая от показаний 3-х ортогонально расположенных датчиков и б) при виброобработке на резонансной частоте 60 Гц.

ках поводковых кронштейнов путем их повторной перепарки уже после виброобработки. Следовательно, оценить повлияло или нет вмешательство сварки после виброобработки на усталостную прочность этой боковины не представлялось возможным.

Испытания боковины № 3 показали, что она имеет также недостаточную усталостную выносливость. В боковине № 5 образовалась трещина на $4,88 \times 10^7$ цикле.

Седьмая боковина выдержала без разрушения 10×10^7 циклов, при пределе выносливости на 25—35 % выше, чем у 3-х качественно отожженных и изготовленных образцах. Показатели динамических напряжений на режимах, при которых произошли разрушения, измеренных тензодатчиками, у боковин № 1, 3, 5 отличаются в меньшую сторону от показателей в отожженных на 1—15 %, причем в боковине № 7 эти показатели выше на 12—35 % по сравнению со всеми испытанными боковинами. Боковина № 2 была снята с испытания на $0,42 \times 10^7$ цикле после обнаруженной с помощью магнитопорошкового контроля несплошности до 30 мм в литой обечайке.

Проведенными исследованиями установлено, что появление трещин на поверхностях боковины имеют усталостное происхождение, и трещины берут начало от границы несплавления металла сварного шва с основным металлом (рис. 4).

Необходимо отметить, что боковины № 1, № 3 и № 5 после выявленных дефектов в сварных швах подвергались перепарке уже после виброобработки. В этих боковинах имелись места со следами значительного перегрева сварных швов, что также свидетельствует об отсутствии постоянства и равных условий эксперимента. Наличие дефектов подтверждает и характер АЧХ (см. рис. 2). В боковинах имевших дефекты, наблюдаются резкие скачки амплитуды, отсутствие стабилизации на протяжении большого времени, т.е. изделие периодически входит в параметрический резонанс.

Выводы

1. Вибродеформационное старение не вызывает на оптимальных режимах обработки изменение сплошности металла в местах сварных швов.

2. На снижение усталостной выносливости оказывает влияние наличие дефектов в металле (раковины, неметаллические включения, непровар в сварном шве), увеличение количества циклов нагружения в процессе виброобработки (время обработки), увеличение амплитуды колебаний (увеличение возмущающей силы).

3. Вибродеформационное старение позволяет на оптимальных режимах при обеспечении требуемого качества сварки и листового металла повысить усталостную выносливость боковин тележек локомотивов на 25—35 %.

4. В процессе вибродеформационного старения на резонансных режимах имеется возможность оценить качество детали по возникающему параметрическому резонансу и спектру амплитуды при сдвиге фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колот В.А. Применение ресурсосберегающих вибрационных и отделочно-упрочняющих методов обработки нежестких деталей в тяжелом машиностроении. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1991. — Сер. 8, вып. 24. — 56 с.
2. Разрушение при циклическом нагружении Ч. 1.: Механика в СССР, 2009. Публикация в Интернет-СМИ — <http://mechanika.ru/299/>.
3. Иващенко Ю.М., Солдатов В.Г. Связь технологических параметров изготовления стальных отливок с их эксплуатационными характеристиками // Вестник Брянского государствен-

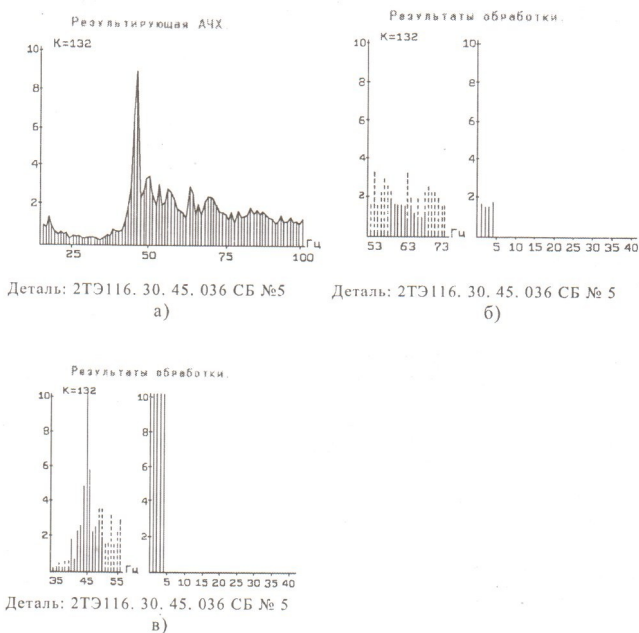


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики детали №5: а) результирующая от показаний 3-х ортогонально расположенных датчиков, б) при обработке на резонансной частоте 46 Гц, в) при обработке на резонансной частоте 60 Гц.

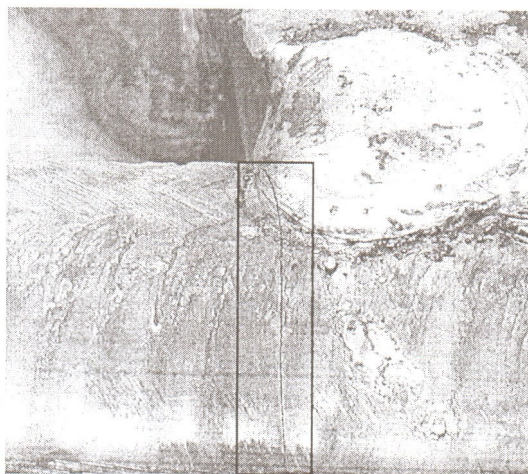


Рис. 4. Фрагмент участка сварного шва с трещиной в боковине № 1.

ного технического университета. Брянск, БГТУ. — 2008. — №2 (18). — С. 20—22.

4. Николаев Г.А., Куркин С.А., Виокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформаций конструкций. Учебное пособие. М.: Высш. школа, 1982. — 272 с.

5. Зубченко О.И., Грузд А.А., Недосека А.Я., Сакало Н.Н., Сагидаев Ю.М., Селицкая И.С. Увеличение долговечности отопительных радиаторов вибрационным методом // Автоматическая сварка, 1976, №2. — С. 72—73.

6. Ярлыков А.П. Стабилизация остаточных напряжений низкочастотной вибрационной обработкой для обеспечения долговечности и работоспособности изделий машиностроения. Остаточные напряжения — резерв прочности в машиностроении: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции / РИСХМ. Ростов н/Д. — 1991. — С. 85—87.

7. Гедрович А.И., Жидков А.Б., Хижняк А.В. Оценка изменения циклической долговечности в результате виброобработки сварных строительных конструкций // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Луганськ, ЛНАУ, 2009. — № 2. С. 226—230.