

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (Обзор)

Г. И. ЛАЩЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На основании имеющихся публикаций выполнен анализ технологических возможностей послесварочной виброобработки и виброобработки в процессе сварки. Показано, что технология послесварочной виброобработки является эффективным средством снижения остаточных напряжений и повышения размерной стабильности балочных, рамных и корпусных конструкций (станкостроение, машиностроение, судостроение и др.), изготовленных из стали, титановых и алюминиевых сплавов. При этом по сравнению с высоким отпускком в десятки раз снижаются энергозатраты и повышается производительность. Виброобработка в процессе сварки и наплавки является эффективным средством снижения остаточных напряжений, повышения механических свойств и служебных характеристик конструкций, улучшения свариваемости ряда марок сталей. Однако опыт промышленного использования этой технологии пока недостаточен для формирования четких рекомендаций по конкретным областям ее применения. Библиогр. 41, рис. 3.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сварные конструкции, остаточные напряжения, виброобработка, нестабильность размеров, повышение сопротивления усталости, свариваемость

Остаточные сварочные напряжения являются нежелательным сопутствующим фактором при образовании сварного соединения. Они, как правило, оказывают отрицательное влияние на точность, коррозионную стойкость, выносливость при динамических нагрузках и эксплуатационную надежность сварных конструкций [1]. Их негативное влияние на сварную конструкцию не всегда удается в нужной степени минимизировать с помощью досварочных, а также выполняемых в процессе сварки мероприятий. Поэтому в ряде случаев прибегают к послесварочной обработке, которая обычно заключается в термическом отпуске сварных конструкций.

В то же время известен ряд технологий, позволяющих снижать энергозатраты на послесварочную обработку сварных конструкций за счет применения проковки, ультразвуковой ударной обработки (высокочастотной механической проковки), дробеструйного наклепа, обработки взрывом, статического нагружения, вибрационной обработки и др. [2]. Все они имеют свои достоинства, недостатки и рациональные области применения.

Целью настоящей работы является анализ технологических возможностей вибрационной обработки и обоснование возможных областей ее промышленного использования.

Послесварочная вибрационная обработка. Послесварочную вибрационную обработку осуществляют посредством возбуждения в сварной конструкции низкочастотных механических колебаний. При этом возникают переменные напряжения, которые суммируются с остаточными свароч-

ными напряжениями. Под действием суммарных напряжений происходит микропластическая, а в определенных условиях и макропластическая деформации, способствующие перераспределению и снижению остаточных напряжений.

Виброобработку осуществляют в режиме нерезонансного и резонансного нагружения. Обработка на нерезонансных частотах имеет ограниченное применение и обычно пригодна для конструкций с малой жесткостью.

В случае резонансного вибрационного нагружения обеспечивается возникновение в металлоконструкции высоких амплитуд динамических напряжений, что существенно влияет на перераспределение напряжений во всем объеме материала.

Начиная с конца 1960 до 1990 гг. исследования процесса виброобработки и ее промышленное применение интенсивно осуществлялись в СССР, США, Великобритании, Польше, Китае и других странах. Основные результаты выполненных работ обобщены в ряде публикаций [3–10]. В 2000 г. интерес к послесварочной виброобработке также оставался достаточно заметным [11–22].

Известны различные технологические схемы послесварочной виброобработки металлоконструкций [8, 10].

Наиболее распространенная схема виброобработки предусматривает установку сварной конструкции на виброизолирующих опорах и крепление к ней вибровозбудителя с регулируемой частотой. Плавным изменением частоты колебаний от минимальной до максимальной регистрируют резонансные частоты системы «сварная конструкция–оснастка–вибровозбудитель». Затем

производят виброобработку на выбранных резонансных частотах.

Управление режимом виброобработки по этой и подобным схемам с дебалансным вибровозбудителем осуществляют энергетическим (по значению энергии, передаваемой в конструкцию), амплитудным (по сдвигу резонансного пика) и фазовым (по изменению фазового сдвига между вынуждающей силой и вынужденными колебаниями) методами.

В состав современного технологического комплекса для виброобработки входят: вибровозбудитель с двигателем переменного тока, акселерометр, измерительный усилитель, выпрямитель, инвертор, индикаторы частоты тока двигателя и амплитуды колебаний изделия, самописец или персональный компьютер [10, 12, 16].

При разработке технологии виброобработки возникает необходимость предварительного определения частот собственных колебаний конструкции.

Для простых конструкций балочного типа с постоянной по длине жесткостью частота собственных колебаний ω с достаточной точностью может быть определена по формуле [16]:

$$\omega = \frac{\pi^2 n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{m_0}}, \quad (1)$$

где n — номер формы собственных колебаний; l — длина пролета между виброопорами; EI_x — жесткость балки на изгиб в продольном направлении; m_0 — масса единицы длины балки.

Как известно, номер формы собственных колебаний определяет число полуволн упругой оси балки при ее колебаниях.

При переходе на более высокую резонансную частоту увеличивается число полуволн по длине балки, соответственно чаще располагаются сечения, в которых возникают максимальные нормальные напряжения, вызванные вибрационным нагружением.

При определении резонансных частот и форм собственных колебаний для сложных конструкций переменной жесткости простые аналитические зависимости не могут быть использованы. Подобные расчеты рекомендуют проводить численными методами, в частности, методом конечных элементов. Так, в работе [16] для этих целей использовали программный пакет ANSYS, который позволяет определять собственные частоты модели и исследовать ее поведение под воздействием гармонически меняющихся нагрузок.

При обработке технологии для контроля изменения остаточных напряжений после виброобработки использовали сканер-дефектоскоп магнитоанізотропный «Комплекс-2». Прибор выдает

карты разности главных механических напряжений, концентраторов местных механических напряжений, а также коэффициента неоднородности распределения напряжений [16].

Для стабилизации геометрических размеров металлорежущего оборудования используют и так называемую конструктивную вибрацию. В этом случае вибронагружение базовых деталей станков осуществляют за счет технологических режимов резания заготовок. В работе [22] предложена методика определения динамической нагрузки для вибрационной обработки станин по этому способу.

Для устранения остаточных деформаций сварных конструкций предложено использовать комбинированное нагружение в виде статического растяжения или изгиба в сочетании с виброобработкой [5, 10]. Эти технологии не получили широкого промышленного распространения. Многолетний практический опыт показал, что послесварочная виброобработка является эффективным средством повышения размерной стабильности сварных конструкций [3–12]. На практике размерная нестабильность изделий, в том числе сварных конструкций, является результатом релаксационных процессов и ползучести, протекающих в материале и сварном соединении под воздействием приложенных конструкционных (эксплуатационных) и остаточных внутренних напряжений [6]. Особенно интенсивно процессы релаксации развиваются в сплавах с метастабильным фазовым и структурным состоянием (в сталях это превращение остаточного аустенита в мартенсит и отпуск мартенсита закалки).

На нестабильность размеров сварных конструкций влияет ряд конструктивно-технологических факторов: основной материал, конструктивная жесткость соединения, термодформационный цикл, применяемые сварочные материалы.

В процессе производства нестабильность размеров сварных конструкций может проявляться на этапе механической обработки, в процессе вылеживания, при изменении температурных условий, а также в процессе эксплуатации под воздействием эксплуатационной нагрузки. Поэтому стабилизирующую вибрационную обработку обычно производят перед механической обработкой, либо дважды — перед черновой и перед чистовой механической обработками.

Виброобработка стальных металлоконструкций из углеродистых и низколегированных сталей позволяет уменьшить напряжения первого рода до 50...60 %, а второго — до 45 %.

В случае обработки конструкций из титановых сплавов напряжения первого рода снижаются до

60...65 %, а алюминиевых — до 70...75 % [4, 10, 11].

Стабилизирующую вибрационную обработку широко используют в станкостроении при изготовлении сварных и литых базовых деталей (основания, станины рамы, поперечины и др.), в судостроении (корпуса подводных лодок из титановых сплавов, корпусные стальные и алюминиевые детали судов и др.), в энергетическом, транспортном и других отраслях машиностроения, в том числе при изготовлении оборонной техники [8–12].

Энергетические затраты при послесварочной обработке металлоконструкций массой до 10 т и более примерно в 50 раз ниже, чем при общем отпуске, а производительность в 15...20 раз выше [10].

Что касается использования послесварочной виброобработки для повышения коррозионной стойкости сварных соединений, то можно сослаться на информацию, приведенную в работах [13, 14]. Ее явно недостаточно для определения рациональных областей использования послесварочной обработки для этих целей. Нужны дополнительные исследования.

Если говорить о возможности использования вибрационной обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений, то в некоторых работах высказано мнение о том, что можно ожидать даже снижение циклической долговечности вследствие накопления усталостных повреждений в процессе обработки [1, 7]. Получаемый результат во многом зависит от перегрузочных напряжений и длительности обработки. Поэтому, чтобы избежать возможного появления усталостных трещин на технологической стадии, разработана методика определения неповреждающих режимов вибрационной обработки сварных соединений, обеспечивающих снижение остаточных напряжений на заданную величину [15].

Эта методика базируется на использовании комплексной диаграммы предельных напряжений цикла, построенной в координатах максимальные напряжения σ_{\max} – средние напряжения σ_T (рис. 1). Линия 1 соответствует пределу выносливости σ_R сварного соединения (конструкции) и ограничена пределом выносливости при симметричном нагружении σ_{-1} и пределом прочности σ_B , а линия 2 — пределом циклической ползучести материала конструкции $\sigma_{ц.п.п}$. Последняя ограничена пределом ползучести при статическом нагружении σ_n (допускается предел текучести σ_T), и пределом выносливости, названным минимальным пределом циклической ползучести $\sigma_{ц.п}$, при котором достигается заданное значение пластической деформации $\epsilon_{пл}$. При разработке технологии виброобработки первоначально экспериментально определяется эпюра остаточных напряжений

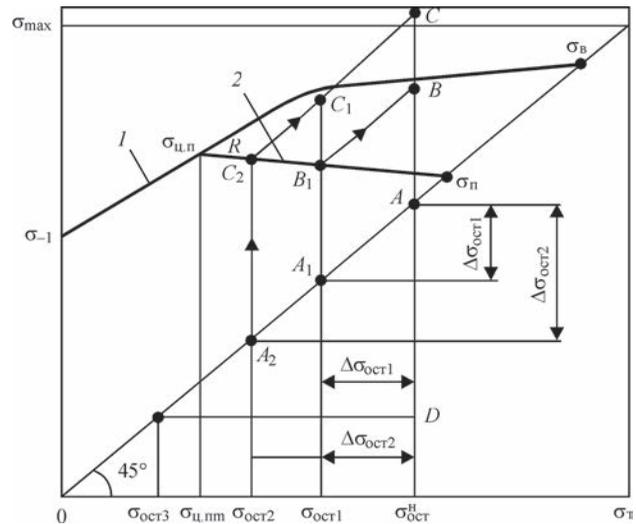


Рис. 1. Назначение неповреждающих режимов виброобработки металлоконструкций для снижения в них остаточных напряжений растяжения на величину не меньше заданной [15] (обозначения см. в тексте)

(ОН) в определенной зоне сварной конструкции и максимальное значение ОН растяжения $\sigma_{ост}^H$ откладывается на диаграмме (т.А). Задается значение напряжения $\sigma_{ост1}$ (т.А), до которого необходимо уменьшить $\sigma_{ост}^H$. Для правильного выбора нагрузки, которая позволила бы снизить ОН на величину не меньше $\Delta\sigma_{ост1}$, необходимо, чтобы линия 2 соответствовала пластической деформации $\epsilon_{пл}$, определенной из условия $\Delta\sigma_{ост1} = E\epsilon_{пл}$. Напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{в.н.}$, которое необходимо приложить к конструкции, определяется из условия

$$\sigma_{ц.п.Р} < \sigma_{в.н.} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R, \quad (2)$$

где σ_R , $\sigma_{ц.п.Р}$ — напряжения, соответствующие точкам пересечения действия циклических напряжений с линиями предельных напряжений 1 и 2 соответственно. Таким образом, условие $\sigma_{в.н.} + \sigma_{ост}^H < \sigma_R$ обеспечивает отсутствие усталостных повреждений после виброобработки, а $\sigma_{ц.п.Р} < \sigma_{в.н.} + \sigma_{ост}^H$ — эффективное снижение ОН.

Диаграмма позволяет анализировать многоступенчатое приложение вибрационной нагрузки для снижения остаточных напряжений на величину $\Delta\sigma_{ост1}$, $\Delta\sigma_{ост2}$, $\Delta\sigma_{ост3}$ и достигаемое при этом снижение остаточных напряжений $\sigma_{ост1}$, $\sigma_{ост2}$ или $\Delta\sigma_{ост3}$. В последнем случае для снижения исходных остаточных напряжений $\sigma_{ост3}$, которое меньше среднего напряжения минимального предела циклической ползучести $\sigma_{ц.п.п}$, рекомендуется приложить асимметричную нагрузку: $\sigma_m = AD$, $\sigma_a = AB$. Если не задаваться условием снижения ОН на величину не меньше заданной, то режимы нагружения можно выбирать произвольно, соблюдая условия (2).

На основании использования рассмотренной выше методики в работе [15] сделан вывод о том,

что вибрационную обработку можно применять для увеличения долговечности только неотвественных конструкций.

Вибронагружение в процессе сварки. В последние годы усилился интерес к технологиям, использующим вибронагружения в процессе сварки [23–30]. Положительное влияние низкочастотной механической вибрации свариваемого изделия на снижение остаточных напряжений и деформаций, повышение стойкости швов против образования кристаллизационных трещин и пор, улучшение механических свойств отмечено в ряде работ, выполненных еще 1980-х гг. [31]. При этом вибрационную обработку рассматривали одним из способов, призванных воздействовать на процессы, протекающие в сварочной дуге, в жидком и кристаллизующемся металле сварочной ванны и прилегающей к ней области основного металла, с целью комплексного улучшения свойств сварных соединений. В этот период были получены соответствующие практические результаты, которые частично нашли применение в промышленности.

В недавно опубликованной работе [23] исследовали влияние вибрации в процессе сварки на хладостойкость сварных соединений толщиной 10 мм из низколегированной стали 09Г2С. Двухстороннюю дуговую сварку выполняли под флюсом, а вибронагружение осуществляли согласно схеме, приведенной на рис. 2, на частоте 50, 100, 150 и 200 Гц с амплитудой 0,8...1,0 мм.

Возбуждение низкочастотных колебаний в расплавленном металле сварочной ванны и прилегающих зонах приводит к снижению средней площади зерна различных участков сварных соединений. При этом максимальное снижение средней площади зерна металла ЗТВ и сварного шва достигается сопутствующим вибрационным воздействием 150 Гц и составляет 32 % для металла

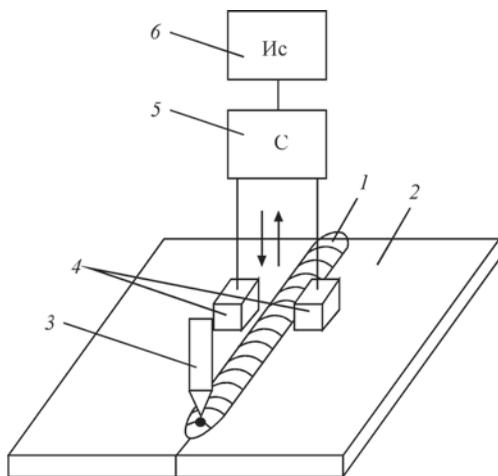


Рис. 2. Схема наложения колебаний в процессе сварки: 1 — сварной шов; 2 — свариваемое изделие; 3 — электрод; 4 — вибрационное устройство; 5 — синхронизатор колебаний; 6 — источник энергии колебаний [23]

ЗТВ и 25 % для сварных швов по сравнению с необработанными образцами. На этой же частоте колебаний максимально снижались поверхностные напряжения, которые определяли методом рентгеноструктурного анализа (рис. 3).

Отмечается, что с увеличением частоты сопутствующего вибрационного воздействия происходит рост ударной вязкости металла сварного соединения КСЧ. При этом максимальное увеличение по сравнению с необработанными образцами достигалось при частоте 150 Гц и составляло 24 % для образцов, испытания которых проводили при 20 °С, и 50 % для образцов, испытания которых проводили при –40 °С.

Авторы считают, что рассматриваемая технология сварки может быть использована при изготовлении металлоконструкций с протяженными швами, работающими в условиях значительного перепада температур окружающей среды.

В работе [24] изучали возможность применения виброобработки взамен предварительного подогрева при сварке деталей нефтеперерабатывающего оборудования из стали 12МХ. Образцы сваривали ручной дуговой сваркой электродами ЦУ-2МХ. Установлено, что при сварке с вибронагружением (частота 50, 100 и 150 Гц, амплитуда 0,8 мм) структура металла шва имеет более высокую дисперсность и однородность. В металле ЗТВ формируется бейнитная структура. Уровень остаточных сварочных напряжений снижается на 16...19 % по сравнению с предварительным подогревом. Улучшаются механические свойства металла шва и оклошовной зоны. Для сварки ответственных конструкций из стали 12МХ рекомендуют использовать два вибрационных устройства, работающих в противофазе [20, 21]. запатентован способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях, согласно которому осуществляют в процессе сварки наложение вибрационных колебаний в поперечном направлении в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси сварного шва, от двух вибраторов, работающих в противофазе на частотах от 50 до 300 Гц с амплитудой до 0,8...1,0 мм и расположенных сим-

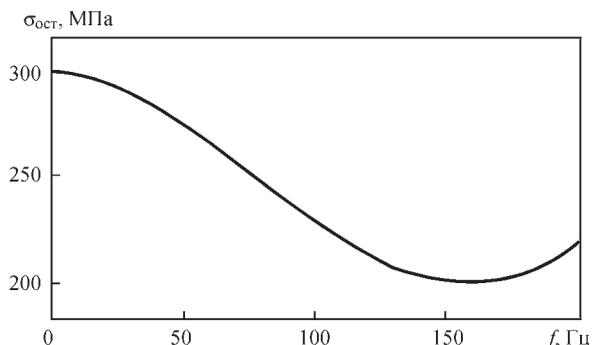


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений 3-го рода от частоты сопутствующего вибрационного воздействия [23]

метрично относительно оси шва на каждой из свариваемых кромок (см. рис. 2) [26].

В другом патенте [27] описан способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов, согласно которому наложение вибрационными устройствами низкочастотных колебаний осуществляют в процессе сварки. При этом частота вибрации равна частоте собственных колебаний участка трубопровода со сварным соединением между точками жесткого закрепления.

Проводились исследования по воздействию на сварочную ванну и прилегающую к ней зону вибрационных колебаний в процессе сварочного цикла с целью изучения их влияния на прочностные характеристики металла шва и склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) соединений из стали 12Х18Н10Т [28]. Вибронагружение осуществлялось на частоте 50 и 100 Гц с амплитудой 0,6...0,8 мм.

Результаты испытаний показали, что образцы, сваренные без вибрационной обработки, оказались подвержены МКК. Образцы, полученные с применением вибрационной обработки, продемонстрировали стойкость к МКК без образования трещин при изгибе. Авторы объясняют это измельчением дендритной структуры металла шва, что приводит к увеличению границ зерна, как следствие происходит нагружение непрерывной карбидной сетки и снижение карбидов на единицу длины границ зерна.

Виброобработка при частоте 50 Гц увеличивает значение ударной вязкости металла сварного шва на 21 %, а при частоте 100 Гц — на 25 %.

В результате снижения остаточных напряжений при вибронагружении в процессе сварки (частота 50 и 100 Гц) повышается сопротивление усталостному разрушению сварных соединений из стали 12Х18Н10Т на 18...22 %.

Аналогичные приведенным выше результаты были получены авторами при сварке двухслойной стали 09Г2С+12Х18Н10Т с применением низкочастотной вибрационной обработки [30].

Вибрация оказывает положительное влияние на формирование структуры и свойства металла отливок [31]. Под действием вибрации расплав интенсивно перемешивается и растущие кристаллы обламываются, в объеме жидкого металла создаются новые центры кристаллизации, уменьшается градиент температур по сечению и обеспечивается объемное затвердевание. Более однородная кристаллическая структура слитков, которая формируется под действием вибрации, обеспечивает меньшую анизотропию свойств структурных составляющих (отдельных кристаллов) и, как следствие, меньшие остаточные напряжения.

Проведенные исследования по определению методом лазерной интерферометрии — электронной спеклинтерферометрии остаточных напряжений в слитках из стали Х18Н9Т показали, что под влиянием вибронагружения (амплитуда 0,5 мм, частота 60...80 Гц) остаточные напряжения снижаются на 20...29 % [30]. В этой же работе авторы приводят экспериментальные данные о снижении остаточных напряжений под воздействием вибрации при сварке образцов из стали Ст.3 до 2,5 раза. Подчеркивается, что низкочастотная вибрация (частота до 200 Гц, амплитуда до 1 мм) приводит к измельчению структуры металла шва и значительному уменьшению количества пор. Кроме того, вибрация оказывает положительное влияние на дисперсность неметаллических включений, их количество и характер распределения в шве.

О возможности измельчения структуры и улучшения свойств наплавленного металла при индукционной наплавке сообщается в ряде работ [33–36]. В этом случае деталь подвергают вертикальной или горизонтальной вибрации в тот момент, когда порошкообразная шихта находится в расплавленном состоянии. Существенное значение имеет направление приложения колебаний, а также их частота и амплитуда.

Эксперименты по индукционной наплавке порошками высокоуглеродистого сплава ПГ-С1 (сормайт 1) с вибрацией (амплитуда колебаний 0,2 мм, частота 50 Гц) показали, что горизонтальная вибрация приводит к заметному измельчению карбидной составляющей [33]. Карбиды, имеющие вид шестигранника со средней длиной стороны 10...12 мкм (в случае наплавки без вибрации), измельчаются до 7...10 мкм при вертикальной и 3,5...7,0 мкм при горизонтальной вибрации. При этом наивысшую твердость и износостойкость показали образцы, наплавленные с горизонтальной вибрацией. Авторы объясняют это благоприятной структурой наплавленного металла и образованием в большей степени карбидов $(Fe, Cr)_7C_3$, что подтверждается результатами микрорентгеноспектрального анализа.

В работах [37–39] сообщается об улучшении свариваемости сталей 20ХГСФЛ, 15Х5М и 12Х17 под воздействием вибрации в процессе дуговой сварки. Это подтверждают и данные, приведенные в работе [31].

Известно, что при сварке сталей с высоким углеродным эквивалентом, особенно высокопрочных, возникает опасность образования холодных трещин [40]. Чаще всего они зарождаются в околошовной зоне. При этом необходимым условием для зарождения и развития холодных трещин является наличие закалочных структур, определен-

ного количества диффузионного водорода и растягивающих напряжений.

Согласно приведенным выше данным работ [23–25, 31, 37–39] виброобработка в процессе сварки способствует измельчению структуры металла шва и ЗТВ, а растягивающие напряжения заметно снижаются. Кроме того, интенсивное перемешивание сварочной ванны должно способствовать десорбции водорода. Поэтому можно высказать предположение о целесообразности применения сопутствующей виброобработки при сварке высокопрочных сталей. Правда, многое требует проверки. Как известно термомеханический цикл сварки приводит к существенной неоднородности концентрации поля водорода [41]. В случае сопутствующей виброобработки деформационная составляющая цикла заметно меняется, что безусловно влияет на перераспределение дислокаций и их взаимодействие с водородом. При этом дислокации выполняют роль ловушек водорода и могут в определенных условиях как повышать, так и снижать опасность образования холодных трещин.

Выводы

Накопленный за последние десятилетия опыт промышленного использования послесварочной виброобработки свидетельствует о том, что эта технология является эффективным средством повышения размерной стабильности стальных сварных базовых деталей металлообрабатывающего оборудования (станины, основания стойки и др.), рамных и корпусных деталей энергетического машиностроения, различных деталей судостроения и оборонной техники, в том числе из титановых и алюминиевых сплавов. При этом величина снижения остаточных напряжений первого рода может достигать 50..60 %, а энергетические затраты уменьшаться по сравнению с общим отпуском до 50 раз.

Послесварочная виброобработка в определенном диапазоне режимов способствует некоторому увеличению сопротивления усталости и может быть использована для повышения долговечности неотчетственных сварных конструкций. По этому показателю она уступает другим технологиям, в частности, проковке.

Многочисленные публикации свидетельствуют о том, что виброобработка в процессе сварки и наплавки является эффективным средством снижения остаточных напряжений, повышения механических свойств и служебных характеристик, улучшения свариваемости ряда марок сталей. Однако опыт промышленного использования виброобработки в процессе сварки пока недостаточен для формулирования четких рекомендаций по конкретным областям ее применения.

1. Сварные строительные конструкции. Т.1. Основы проектирования конструкций; под ред. Л. М. Лобанова. – К.: Наукова думка, 1993. – 416 с.
2. Лашенко Г. И. Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций / Г. И. Лашенко, Ю. В. Демченко. – К.: ЭкоТехнологія, 2008. – 168 с.
3. Писаренко В. С. Снижение остаточных напряжений вибрационной обработки (Обзорная информация / В. С. Писаренко, Н. И. Вержбинская. – М.: НИИ Информатизма, 1972. – 38 с.
4. Грузд А. А. Исследование деформации сварных конструкций во времени и изыскание способов их учета и стабилизации / А. А. Грузд. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона, 1973. – 193 с.
5. Сагалевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В. М. Сагалевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
6. Сагалевич В. М. Стабильность сварных соединений и конструкций / В. М. Сагалевич, В. Ф. Савельев. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.
7. Даусон Р. Вибрационное снятие напряжений и исследование его эффективности / Р. Даусон, Д. Г. Моффат // Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1980. – № 2. – С. 1–9.
8. Рагульскис К. М. Вибрационное старение / К. М. Рагульских, Б. Б. Ступильнас, К. Б. Толутас. – Л.: Машиностроение, 1987. – 72 с.
9. Sedek P. Stabilizacja wibracyjna konstrukcji spawanych / P. Sedek // Przegląd Spawalnictwa. – 1990. – № 7. – С. 16–18.
10. Лашенко Г. И. Вибрационная обработка сварных конструкций / Г. И. Лашенко. – К.: ЭкоТехнологія, 2001. – 55 с.
11. Горбач В. Д. Современные проблемы сварки и долговечности сварных судостроительных конструкций / В. Д. Горбач, О. Г. Соколов, В. С. Михайлов // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10–11. – С. 163–169.
12. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении (теория, исследования, технология) / А. И. Дрыга. – Краматорск: ДГМА, 2004. – 168 с.
13. Xhou Wei. Исследование возможности снижения напряжений в соединениях из стали SWA490BW, стойкой к атмосферной коррозии путем виброобработки / Xhou Wei, Chen Hui // Dian Hanji-Elec. Welding Mach. – 2012. – № 9. – С. 62–65.
14. Повышение стойкости сварных соединений / А. П. Бабищев, В. И. Бутенко, А. Н. Чукарин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 6. – С. 3–6.
15. Дегтярев В. А. Влияние видов упрочняющей обработки сварных соединений на повышение их сопротивления усталости / В. А. Дегтярев // Проблемы прочности. – 2013. – № 5. – С. 85–103.
16. Технологии низкочастотной виброобработки сварных конструкций в машиностроении / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисуров [и др.] // Сварочное производство. – 2014. – № 6. – С. 19–23.
17. The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress / D. Rao, D. Wang, L. Chen, C. Ni [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2007. – № 29.
18. Simulation of Vibration Stress Relief After Welding Based on FEM / X. C. Zhao, Y. D. Zhang, H. W. Zhang, Q. Wu [et al.] // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2008. – Vol. 21, № 21.
19. Sedek P. Stabilizacja wibracyjna – staly rozwoj dca praktyki przemyslowej / P. Sedek, M. Welzel, K. Kwiecinski // Biullryn Instytutu Spawalnictwa. – 2016. – № 1. – С. 29–35.
20. Yang Y. P. Finite Element Modeling of Vibration Stress Relief after Welding / Y. P. Yang, C. Jung, R. Yancey // Proceeding of the 7th Conference on Trends in Welding Research, May 16–20, 2005, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA.
21. Klauba B. B. Vibratory Stress Relief: Methods used to Monitor and Document Effective Treatment. A Survey of Users and Directions for Further Research / B. B. Klauba, C.

- M. Adams, J. T. Berry // *Proceeding of the 7th Conference on Trends in Welding Research*, May 16–20, 2005, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA.
22. Теоретические аспекты вибротехнологий старения сварных станин нестандартного оборудования / Ю. А. Филиппов, Н. А. Амелеченко, Л. В. Ручкин [и др.] // *Технология машиностроения*. – 2002. – № 4. – С. 33–35 с.
 23. Повышение надежности нефтегазового оборудования, работающего в условиях значительного перепада температур / В. Д. Каретников, Р. Г. Ризванов, А. И. Файрушин [и др.] // *Технология машиностроения*. – 2014. – № 4. – С. 33–37.
 24. Абдуллин Т. З. Исследование влияния вибрационной обработки в процессе сварки на механические свойства сварных соединений / Т. З. Абдуллин, И. Г. Ибрагимов, А. М. Файрушин // *Сварка и Диагностика*. – 2013. – № 1. – С. 36–38.
 25. Абдуллин Т. З. Совершенствование технологии изготовления сварного оборудования из теплоустойчивой стали 12МХ: автореф. дис. на получение научной степени канд. техн. наук. – Уфа: Уфим. гос. нефт. техн. ун-т, 2013. – 23 с.
 26. Пат. 2424885 Россия. Способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях металлов / А. М. Файрушин, Д. В. Каретников, М. З. Заритов [и др.]. – Оpubл. 27.07.2011.
 27. Пат. 2492037 Россия. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов / В. И. Болотов, О.Ф. Хафизов, А. М. Файрушин [и др.]. – Оpubл. 10.09.2013.
 28. Повышение прочности сварных соединений из стали 12Х18Н10Т применением низкочастотной вибрационной обработки в процессе сварки / Р. М. Ахтямов, И. Г. Ибрагимов, М. З. Зарипов [и др.] // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 1. – С. 38–41.
 29. Ахтямов Р. М. Повышение прочности сварных соединений из двухслойной стали 09Г2С+12Х18Н10Т применением низкочастотной вибрационной обработки в процессе сварки / Р. М. Ахтямов, М. З. Зарипов, А. М. Файрушин // *Техника и технология. Новые перспективы развития: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции*. – Москва, 18 апр. 2012. – М.: 2012. – С. 8.
 30. Влияние вибрации на формирование макро- и микроструктуры затвердевающих стальных слитков / А. С. Нурадинов, В. А. Ефимов, Е. Д. Таранов [и др.] // *Материаловедение*. – 2004. – № 5. – С. 24–26.
 31. Лашенко Г. И. Способы дуговой сварки сталей плавящимся электродом / Г. И. Лашенко. – К.: Екотехнологія, 2006. – 384 с.
 32. Нурадинов А. С. Влияние вибрации на остаточные напряжения в слитках и сварных швах / А. С. Нурадинов, А. С. Эльдарханов, Е. Д. Таранов // *Сталь*. – 2012. – № 4. – С. 19–20.
 33. Влияние вибраций детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла / Ч. В. Пулька, О. Н. Шаблій, В. С. Сенчишин [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 1. – С. 27–29.
 34. Пат. на корисну модель UA № 54204 МПК В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких плоских сталевих деталей / О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин [та ін.]. – Бюл. № 20 від 25.10.2010.
 35. Пат. на корисну модель UA № 59994 МПК В23К 13/00. Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків / Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин. – Бюл. № 11 від 10.06.2011.
 36. Пат. на корисну модель UA № 64371 МПК В23К 13/00. Спосіб наплавлення деталей / Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин. – Бюл. № 21 від 10.11.2011.
 37. Файзулин А. В. Ремонтная сварка корпуса насоса, изготовленного из среднеуглеродистой стали 20ХГСФЛ / А. В. Файзулин, А. И. Мадретдинов, В. Д. Каретников // 13-я Международная молодежная научная конференция «Сервергеозко-2012», Ухта, 21–23 марта 2012. Ч. 6. – Ухта, 2012. – С. 70–72.
 38. Ризванов Р. Г. Исследование влияния вибрационной обработки на механические свойства и трещиностойкость сварных соединений труб из жаропрочной стали 15Х5М / Р. Г. Ризванов, А. М. Файрушин, Д. В. Каретников // *Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал*. – 2013. – № 1. – С. 369–382.
 39. Халимов Д. Н. Исследование влияния вибрационной обработки в процессе сварки на механические свойства сварного соединения из стали 12Х17 / Д. Н. Халимов, В. В. Самигушин, А. М. Файрушин // 64-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, Уфа, 2013: Сборник материалов конференции. Кн. 1. – Уфа, 2013. – С. 234.
 40. Лобанов Л. М. Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350..890 МПа / Л. М. Лобанов, В. Д. Позняков, О. В. Махненко // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 7. – С. 8–13.
 41. Индуцированные водородом холодные трещины в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей (Обзор) / И. К. Походня, А. В. Игнатенко, А. П. Пальцевич [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 5. – С. 3–14.

Поступила в редакцию 11.03.2016

НОВАЯ КНИГА

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2016. – 98 с. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2015book.pdf>).

Сборник содержит доклады, представленные на Седьмой международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 14–18 сентября 2015 г., Одесса, Украина, в которых отражены последние достижения в области лазерной сварки, резки, наплавки и других современных технологий лазерной обработки материалов. Рассматриваются перспективы применения лазерных технологий. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из нескольких стран мира.

Архив предыдущих шести конференций «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» на сайте:

<http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp>

