

УДК 621.9.048 : 621.791 – 442.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО ЦИКЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ОБРАЗЦАХ. ЧАСТЬ 1. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ АМПЛИТУДЫ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЯ

Гедрович А.И., д.т.н., проф., Хижняк А.В., асп.

Восточнoукраинский национальный университет имени Владимира Даля

91034, г. Луганск, кв. Молодёжный, д. 20 А

E-mail: svarka@snu.edu.ua, Khial@rambler.ru

Приведені результати аналізу літературних джерел із визначення оптимальної амплітуди вібраційного напруження. Розглядаються експериментальні та теоретичні підходи до вирішення даного питання.

Ключеві слова: вібраційна обробка, залишкові напруження, зварка, амплітуда.

Results of the analysis of references about definition of optimum amplitude of a vibrating pressure are given. Theoretical and experimental attempts of this task solution are considered.

Key words: vibratory treatment, stress relief, welding, amplitude.

Введение. Снижение остаточных напряжений (ОН) после сварки, литья и механообработки является важной задачей. В настоящее время для этого применяются различные методы. Это термообработка (отжиг и отпуск), статическое нагружение, прокатка швов, вибрационная обработка (ВО) и др. По объёмам использования первое место занимает термообработка. Главным недостатком термообработки (ТО) являются значительные затраты энергии, длительность процесса, а также высокая стоимость печей. Это особенно заметно при увеличении веса и размеров изделий.

Учитывая постоянную потребность промышленности в уменьшении потребления энергоносителей, необходимо развивать методы снижения напряжений (СН) с малым энергопотреблением. Одним из таких методов является виброобработка. Многократными исследованиями была доказана экономическая выгода от применения виброобработки в сравнении с ТО [1-5], особенно при обработке крупногабаритных конструкций.

Этому методу в последнее время уделяется внимание не только у нас в стране, но и во всём мире. Необходимо отметить достижения в этом направлении таких исследователей, как В.М. Сагалевич, А.И. Дрыга, Г.И. Лашенко, а также работы, проведенные в ИЭС им. Е.Патона.

За рубежом различными организациями также проводятся подобные исследования. Кроме того, существует ряд фирм, которые специализируются именно на ВО металлоконструкций, например, VSR Technology Group, Meta-Lax, Stress Relief engineering company (Formula 62). Но, несмотря на наличие большого количества работ по этой теме, до сих пор у авторов нет единого мнения по механике процесса вибрационной обработки. Например, нет однозначного ответа на вопрос: какая минимальная величина

амплитуды вибронапряжения необходима для снижения ОН до определённого уровня?

Проблема определения минимально эффективной амплитуды вибронагружения является очень важной, т.к. в большинстве случаев обработать изделие равномерно и полностью колебаниями значительной силы не представляется возможным. На это существует ряд причин:

- ограниченность любой из возможных схем установки изделия, наличие узлов жёсткости;
- нехватка мощности вибратора для крупногабаритных конструкций и т. п.

Исходя из этого, при дальнейшем анализе работ повышенное внимание будет обращаться на успешные результаты, полученные при малых амплитудах вибрационных напряжений (ВН).

Цель работы. Анализ известных по определению воздействия амплитуды ВО, выявление оптимальных амплитуд вибронапряжения, время обработки и определение влияние асимметрии цикла нагружения при вибрационной обработке сварных соединений.

Материал и результаты исследования. В статье рассматриваются исследования только на простых образцах (как правило, наплавка валика на кромку). Обработка сложных конструкций ввиду неясности распределения ВН рассматриваться не будет. К остаточным напряжениям можно подходить как к напряжениям первого, второго и третьего родов.

Большинство авторов, работающих с ВО, рассматривают напряжения первого рода (которые уравниваются в макрообъёмах).

Авторы некоторых работ [2,3,6,7] уделяют внимание напряжениям второго (которые уравниваются в зёрнах и кристаллах) и даже третьего рода (которые уравниваются в кристаллической

решётке). При этом рассматриваются смещения кристаллов и дислокаций кристаллической решётки.

В данной работе пойдёт речь о напряжениях, уравниваемых в макрообъёмах (первого рода). Кроме того, автор ограничивается рассмотрением конструктивных низкоуглеродистых сталей как наиболее широко используемых для сварных конструкций.

Как известно, напряжения в сварных конструкциях после сварки распределяются следующим образом. Шов и околошовная зона испытывают растягивающие напряжения, близкие или равные пределу текучести, зоны по бокам от околошовной зоны

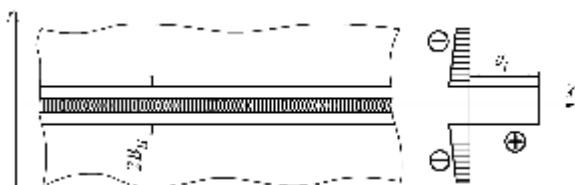


Рисунок 1 – Приложение статической нагрузки вдоль шва

находятся в сжатом состоянии, компенсируя растягивающие напряжения (рис. 1).

Далее рассмотрим принцип работы ВО применительно к сварным соединениям. Для снижения ОН силовым нагружением в сварных конструкциях под руководством В. М. Сагалевица была разработана общая методика [8], которая требует растянуть волокна зоны пластической деформации вдоль оси шва. Как правило, это делают при помощи приложения растягивающих напряжений вдоль шва [8]. Направление нагружения не зависит от типа сварного соединения, его длины и толщины металла [8,9] (рис. 2).



Рисунок 2 – Приложение статической нагрузки вдоль шва

Величина нагружения при статической нагрузке в идеале должна достигать предела текучести, что обеспечивает полное снятие ОН.

Необходимо отметить, что в реальных конструкциях со сложным расположением сварных швов не представляется возможным всегда накладывать как статическую, так и вибронгрузку вдоль шва. Существует предположение, что при вибрационном нагружении величины создаваемых напряжений могут быть меньше, чем при статическом.

Основная на сегодняшний момент модель, объясняющая это явление, предложена В.А.Судником и А.П. Ярлыковым – авторами работы [10]. Основой этой модели служит то, что пластическая деформация при циклической нагрузке начинается гораздо раньше, чем при статической. Для определения необходимого напряжения авторы [10] предлагают пользоваться диаграммой усталости материала (кривой Веллера), представленной на рис. 3, с использованием дополнительных данных.

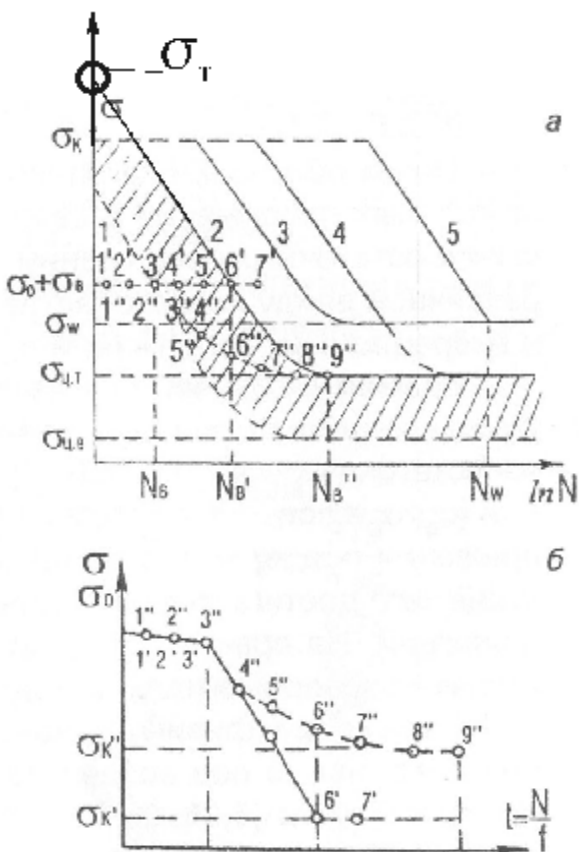


Рисунок 3 – Схема обобщённой диаграммы усталости (а) и кинетика уменьшения остаточных напряжений (б): 1 – начало микроскопического течения; 2 – макроскопическое течение; 3 – линия окончания макроскопического течения; 4 – линия начала субмикроскопических трещин; 5 – кривая усталостного разрушения; σ_k – критическое напряжение усталости; $\sigma_{цт}$ – циклический предел текучести; σ_w – предел усталости; $\sigma_{цк}$ – циклический предел усталости; σ_0 – остаточные напряжения; σ_b – вибрационные напряжения

Методика определения режима следующая: по оси напряжений находится амплитуда напряжения, которого необходимо добиться вибратором, и далее определяем количество циклов нагружения – минимальное и максимальное.

Минимальное количество циклов - такое, при котором начинается обработка, а максимальное, – при котором уже могут появиться микродефекты в материале. Если следовать этой модели, должна быть минимальная амплитуда напряжения, при которой будет происходить обработка. Эти напряжения будут меньше точки $\sigma_{цт}$ (рис. 3).

При таком взгляде на вопрос не учитывается, что в самом изделии уже есть остаточные напряжения, достигающие предела текучести. Сами авторы [10] об этом говорят, что остаточные напряжения нужно добавить к вибрационным. Такого мнения также придерживаются и авторы [2,4]. Это и показано на диаграмме – точка $\sigma_0 + \sigma_B$. Если взять кривую Веллера [11], то можно увидеть, что кривая текучести (рис. 3 - кривая 1, обозначенная пунктиром) при $N_{ц} = 0$ начинается при напряжениях, равных или близких σ_T . Автор данного обзора отметил на рис. 3 это место кружком. Так как известно [8,9], что остаточные напряжения в сварных конструкциях из низкоуглеродистых сталей достигают предела текучести, то именно на зону с этими напряжения необходимо воздействовать во время ВО. Тогда становится понятным, что сумма остаточных напряжений и вибрационных будет выше, чем σ_T . Поэтому линия 1'-7' из рис. 3 не соответствует обработке сварных соединений, т. к. она проведена ниже точки σ_T .

Кроме того вызывает вопрос то, почему точка 9" (конец линии 3"-9") находится не ниже и не выше? Из такого расположения точки 9" получается, что напряжения при ВО снизятся до уровня циклического предела текучести (для ВСт 3 $\sigma_{цт} = 130$ МПа, рис. 4.), т. е. такой подход вызывает вопросы, и мы считаем, что он не решает проблему определения амплитуды вибронпряжений для ВО в конструкциях, где остаточные напряжения достигают предела текучести.

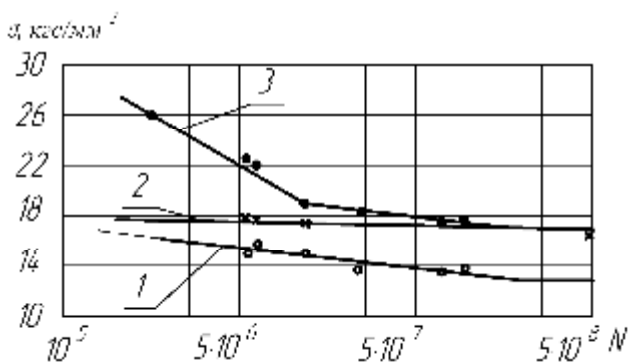


Рисунок 4 – Диаграмма усталостного разрушения для Стали 20 [15]

1 – начало образования субмикроскопических трещин; 2 – начало образования микротрещин; 3 – окончательное разрушение

Анализируя работу [10], можно говорить, что существует некоторое начальное количество циклов, при которых нет эффекта (от нуля до точки N_B по горизонтальной оси $\ln N$ на рис. 3). Такая информация противоречит результатам большинства исследований [12-14], которые говорят о максимальном эффекте в первые $10 \div 100$ циклов. Исходя из нестабильности размеров сварных необработанных конструкций, можно предположить, что если в материале присутствуют ОН, равные пределу текучести, то минимального напряжения, при котором начинает идти обработка, не будет, т.е. в сварных изделиях снижение ОН будет даже при самых малых величинах вибрационных напряжений. При этом значение, на которое уменьшаться ОН, будет зависеть от приложенных вибрационных напряжений. Подтверждением такого суждения является график на рис. 5 [11].

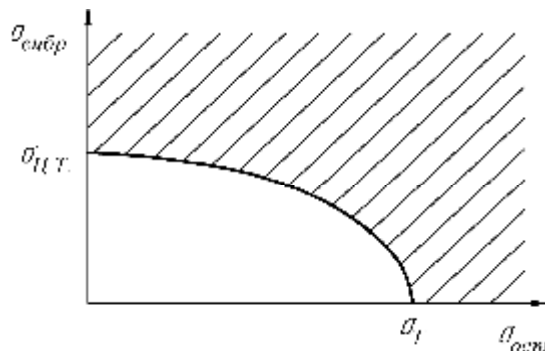


Рисунок 5 – Зависимость циклической текучести от остаточных напряжений. Линия обозначает начало течения материала σ_T – предел текучести; $\sigma_{цт}$ – предел циклической текучести; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения в материале; $\sigma_{вibr}$ – амплитуда вибрационных напряжений

Суть данного графика состоит в том, что начало текучести материала зависит от напряжений остаточных и вызванных колебаниями. Линия отделяет зону циклической текучести и статическую зону. Зона циклической текучести показана штриховкой. Такой точке зрения хорошо соответствуют результаты работы [12].

Работу выполнили Е.П. Оленин, А.С. Аверин, Е.В. Добротина, О.К. Алексеев.

Авторы проводили опыты с разной амплитудой вибрационных напряжений – 10, 20, 30, 40 МПа (здесь важно заметить, что эти значения гораздо меньше $\sigma_{цт} = 130$ МПа). Количество циклов нагружения было везде одинаково – $N_{ц} = (2 \div 3) \cdot 10^4$. Опыты проводились на симметричном цикле нагружения ($R = -1$, т. е. $\sigma_{max} > 0$, $\sigma_{min} < 0$ и $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$) на установке по схеме «балка с шарнирными опорами» (рис. 6).

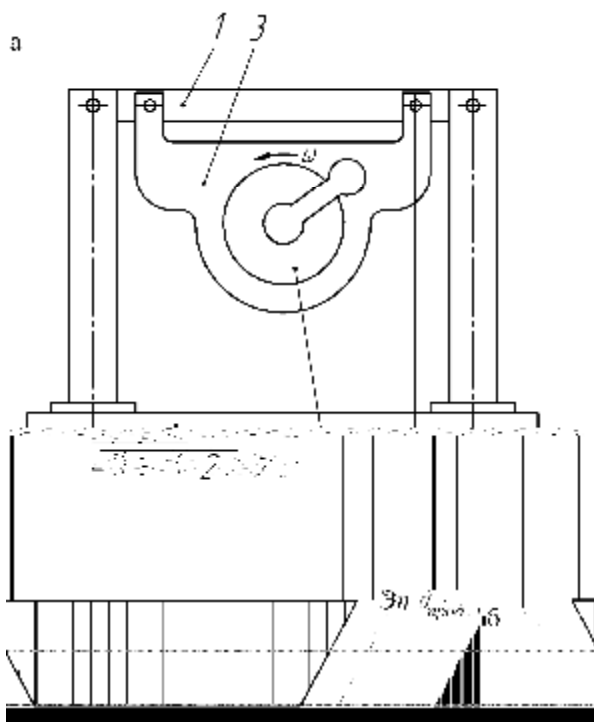


Рисунок 6 – Схема виброобработки образцов в работе [12]:

а – лабораторный стенд: 1 – образец, 2 – вибратор, 3 – промежуточная балка, 4 – основание; б – эпюра продольных вибрационных напряжений

В образцах (наплавка валика на кромку) остаточные напряжения достигали предела текучести. Материал образцов – ВСт 3. Размер образцов – 300×40×2 мм. Даже при вибрационном напряжении в 10 МПа наблюдается снижение ОН. Наилучшие результаты были получены с использованием вибрационного напряжения 40 МПа (снижение до 0,15·σ_T).

Учитывая данные, приведённые авторами этой работы, можно сказать, что с увеличением амплитуды вибрационного напряжения растёт не только эффективность обработки, но и, кроме этого, увеличивается эффективность процесса на начальной стадии (рис. 7).

Из графиков видно, что снижение ОН с уменьшением амплитуды ВН происходит более медленно, но всё равно происходит. Используя данные этой работы, можно сказать, что для эффективной обработки необходимо добиться амплитуды 30 МПа при количестве циклов (2÷3)·10⁴.

Р.Даусон, Д.Г.Моффат [13] проводили эксперименты с разными амплитудами на знакопеременном цикле. Для опытов использовались консольные образцы сечением 12×12 мм, внутренние напряжения в которых получались при помощи изгиба. С точки зрения автора данного обзора, такой метод получения ОН вызывает сомнения. Авторы работы [13] получили следующие результаты: есть минимальная амплитуда вибрационных напряжений, выше которой начинается обработка, причём амплитуда при-

мерно одинакова для разных остаточных напряжений – как для σ₀ = 240 МПа, так и для σ₀ = 120 МПа это σ_A = 0,3·σ_T.

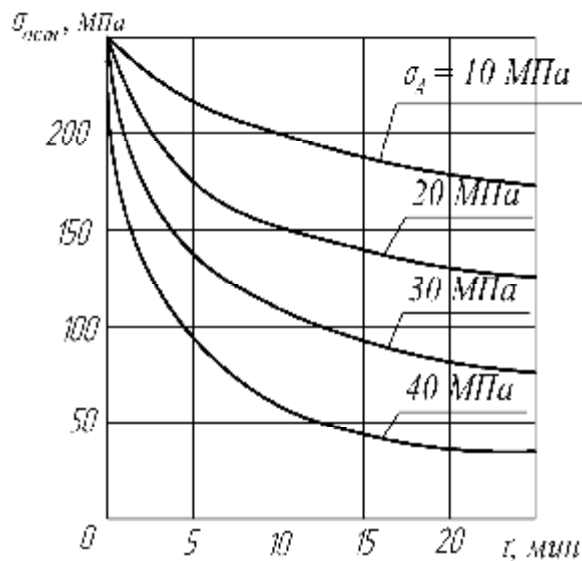


Рисунок 7 – Зависимость остаточных напряжений от амплитуды вибрационных напряжений и времени обработки, полученная авторами работы [12]

Результаты этой работы противоречат результатам работы [12], в которой на знакопеременном цикле виброобработка идёт при σ_A = 10 МПа.

Авторы работы [14] М.Н.Могильнер и М.Н.Полнов, работая на знакопеременном цикле, получили результаты, показанные на рис. 13. Опыты проводились на образцах со стыковым швом. Накладывались знакопеременные изгибающие напряжения вдоль шва. Количество циклов – N_ц = 8·10⁴. Анализируя графики (рис. 8), можно сказать, что результаты этой работы по величине амплитуд занимают среднее положение между результатами работ [12] и [13].

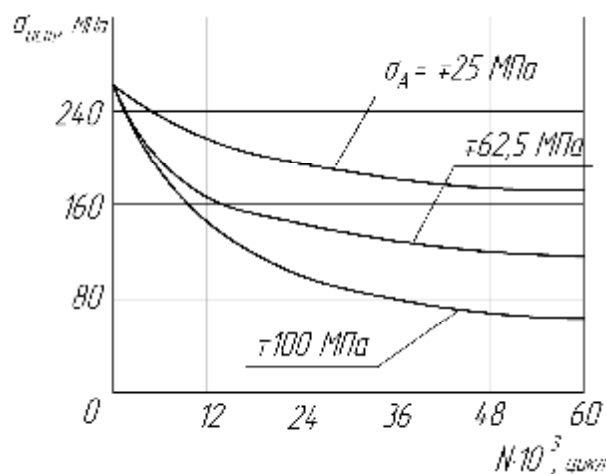


Рисунок 8 – Зависимость остаточных напряжений от амплитуды вибрационных напряжений и количества циклов обработки, полученная авторами работы [14]

Следует отметить особо, что авторы предлагают математическую модель зависимости остаточных напряжений от циклических:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{0.ИСХ}} \cdot 100\% = 54,455 - 14,368 \cdot N - 16,358 \cdot \sigma_{ПЕР} + 6,935 \cdot N^2 - 6933 \cdot N \cdot \sigma_{ПЕР} + 4,995 \cdot \sigma_{ПЕР}^2,$$

где σ_0 – остаточные напряжения в сварном образце после виброобработки;

$\sigma_{0.ИСХ}$ – остаточные напряжения до виброобработки;

N – количество циклов нагружения;

$\sigma_{ПЕР}$ – амплитуда вибронапряжения.

Но если при этом численно сравнить результаты, приведенные на графике рис. 8 и получаемые по приведенной аналитической зависимости, то соответствия не обнаруживается. Авторы зависимости [14] не приводят данных об используемой размерности величин, участвующих в расчётах. Автор данной статьи сделал проверку этой формулы в системе СИ, а также в других возможных комбинациях единиц, и не нашёл совпадения аналитических результатов с графиками. При этом необходимо отметить, что рассматриваемая зависимость далее приводится другими авторами [2] как закон изменения остаточных напряжений после ВО.

Выводы. Анализ опубликованных работ свидетельствует о том, что экспериментальные результаты разных авторов противоречат друг другу. По результатам ранее проделанных работ на симметричном знакопеременном цикле невозможно установить минимальные амплитуды, необходимые для ВО. Поэтому нужны дополнительные исследования в данном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гозман Я. Б. Вибрационная обработка деталей для стабилизации их размеров // Станки и инструмент. – 1985. – № 4. – С. 29-31.
2. Лащенко Г.И. Вибрационная обработка сварных конструкций. – К.: Екотехнологія, 2001. – 56 с.
3. Дрыга А.И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении: Теория, исследования, технология // Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск: ДГМА, 2004. – 167 с.
4. Рагульскис К.М., Ступлинас Б.Б., Толутис К.Б. Вибрационное старение. Л.: Машиностроение. - 1987. – 72 с.
5. Петров А.Ф. Вибрационная обработка деталей для снятия напряжений // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – № 1. – С. 45.
6. Полнов В.Г., Чикалиди О.Г., Иванова Г.Н., Могильнер М.Н.. Влияние вибрационной обработки на механические свойства сварных соединений низкоуглеродистой стали и стали 09Г2С // Сварочное производство. – 1991. - №6. – С. 20-21.
7. A. Uebersax, M. Geering and U. Stuhr // Influence of Vibratory Stress Relief Treatment on Residual Stresses and Durability of Aluminum 7050-T7451 Specimens.
8. Сагалевич В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение. - 1974. – С. 109-124
9. Гедрович А.И. Пластическая деформация при сварке. – Луганск: Издательство Восточноукраинского гос. ун-та, 1998. – 237 с.
10. Ярлыков А.П., Судник В.А. Механизм релаксации остаточных сварных напряжений при циклическом нагружении // Управление сварочными процессами. – Тула. – 1979 г. – С. 62-68.
11. Бишоп Р.Е. Колебания. Пер. с англ. М.Ф. Диментберга, К.В. Фролова; Под ред. Я.Г. Пановко. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1968. - 161 с.
12. Снижение виброобработкой остаточных напряжений в сварных элементах / Е.П. Оленин, А.С. Аверин, Е.В. Добротина, О.К. Алексеев // Сварочное производство. – 1983. - № 5. – С. 11-13.
13. Даусон Р., Моффат Д.Г. Вибрационное снятие напряжений и исследование его эффективности // Труды американского общества инженеров-механиков. – 1980. – № 2. – С. 1-9.
14. Могильнер М.Н., Полнов М.Н.. Определение режимов обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений // Сварочное производство. – 1984. - № 2. – С. 32.
15. Фридман Я.Б., Механические свойства металлов. - М.: Машиностроение, 1974. - 368 с.

Статья поступила 29.10.2008.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф.
Черным А.П.