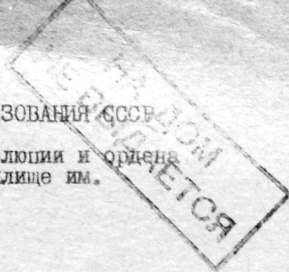


М387633

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им.
Н.Э.Баумана



На правах рукописи

ПОДСОСОВ ЕВГЕНИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПРАВКИ
ТОНКОЛИСТОВЫХ СВАРНЫХ КУЗОВОВ ВАГОНОВ С
ПРИМЕНЕНИЕМ НАГРЕВА И РАСТУЖЕНИЯ

(Специальность 05.04.05 – Технология и
машины сварочного
производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 1981

Работа выполнена в Калининском филиале ВНИИ вагоностроения

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор В.М.Сагалевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор С.Н.Киселев
кандидат технических наук,
Б.С.Денисов

Ведущее предприятие: - указано в решении специализиро-
ванного Совета

Защита состоится " ____ " _____ 198 г.

на заседании специализированного Совета К 053.15.03
по технологии и машинам сварочного производства Москов-
ского ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и
ордена Трудового Красного Знамени Высшего технического
училища им. Н.Э.Баумана
2-я Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы в двух
просим выслать по указанию

С диссертацией мож-
МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разосла-

Ученый секретарь
специализированного
доктор технических

Л-86683

Подписано к печати 27.
Тираж 105 экз. Типографи

М 387633

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решениями XXVI съезда партии предусмотрено дальнейшее увеличение выпуска пассажирских вагонов. Основная доля прироста продукции должна быть достигнута за счет увеличения производительности труда в результате внедрения высокоэффективной технологии.

При изготовлении кузовов железнодорожных вагонов, представляющих собой сварные тонколистовые цилиндрические оболочки, возникает серьезная научно-техническая проблема, связанная с устранением остаточных деформаций гофрированной обшивки.

Несмотря на то, что оболочки кузовов вагонов изготавливаются, в основном, с применением контактной точечной сварки, уровень остаточных деформаций гофрированной обшивки достаточно велик. Все это требует больших трудозатрат на производство правильных работ. Так, по данным зарубежных источников, трудоемкость правки кузовов пассажирских вагонов достигает 20% от общей трудоемкости изготовления металлоконструкций кузовов.

Анализ причин появления деформаций показывает, что последние возникают не только в результате термомеханического воздействия сварки, но и, как следствие, других технологических операций гибки, штамповки, транспортировки и др.

Особенно острым вопрос устранения деформаций стал в последнее время в связи со строительством вагонов из нержавеющей стали марки 12Х13Г18Д (ДИ-61). Высокие коррозионные и механические свойства этой стали дают возможность понизить толщину обшивки оболочки кузова до 1 мм и изготавливать кузов без окраски, что при программе Калининского вагоностроительного завода дает экономический эффект в сумме около 5 млн. рублей.

Использовать положительные свойства нержавеющей сталей возможно только при качественной правке кузовов. Гост 12406-79 "Технические требования на магистральные вагоны колеи 1524 мм" требует ограничения величины деформации обшивки до 1 мм на погонном метре.

На отечественных вагоностроительных заводах правка осуществляется, главным образом, с применением ударных способов.

I

НБТ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1387633

Подсосов Е. В. Исследование



В результате ударного деформирования в гофрированной обшивке возникает неустойчивое поле самоуравновешенных сжимающих напряжений, легко изменяющееся под действием внешних нагрузок. Недостатком такой правки является также низкая эффективность и большие затраты тяжелого физического труда.

Целью работы являлось исследование и разработка термомодеформационного способа машинной правки крупногабаритных узлов кузовов вагонов, а также разработка устройств для его реализации.

Методы исследования, использовавшиеся в работе, включали аналитические и экспериментальные исследования термомодеформационного способа правки, исследование механизма правки и оценки изменения остаточных сварочных деформаций и напряжений. Аналитические исследования выполнялись на цифровых ЭВМ с применением специальных расчетных схем на базе методов теории упругости и пластичности. Экспериментальные методы включали в себя оценку изменения остаточных сварочных и технологических деформаций в зависимости от режима термомодеформационного воздействия на разработанных стандартах и приспособлениях. Статистические методы экспериментальной оценки остаточных деформаций обшивки проводились с помощью разработанного способа измерений на базе созданной автоматизированной системы.

Научная новизна работы заключается:

- в раскрытии механизма устранения технологических деформаций гофрированных подкрепленных панелей, заключающегося в образовании зон пластичности в гофрах в результате взаимодействия внешних усилий растяжения, усилий, действующих перпендикулярно плоскости обшивки, и усилий, вызванных нагревом гофров;

- в разработке автоматизированного способа измерений волнистости плоских и цилиндрических панелей, основанного на разностном принципе, заключающегося в том, что сигнал измерительного устройства представляется в виде конечного числа комплексных гармоник, каждая из которых преобразуется в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой устройства.

Практическая ценность работы заключается в разработке и исследовании термомодеформационного способа правки крупногабаритных узлов кузовов вагонов и разработке оборудования для правки.

Практическую ценность представляет также разработанный способ измерения волнистости протяженных плоских и цилиндрических панелей и созданная на его базе автоматизированная система измерений, позволяющая выявить величины и характер деформаций волнистости обшивки оболочки на каждом технологическом этапе изготовления кузовов вагонов.

Апробация работ. Основное содержание работы доложено на Всесоюзном совещании "Комплексная механизация и автоматизация производства сварных конструкций" (г. Пенза, 1977 г.); на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" (Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980 г.); на научно-техническом Совете Калининского филиала Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения (Калинин, 1980 г.).

Оборудование для правки экспонировалось на ВДНХ СССР (1980 г.) и отмечено серебряной медалью и бронзовыми.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, включая 2 авторских свидетельства и получено 4 положительных решения Госкомитета СССР по делам изобретений и открытий.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, изложенных на 187 страницах машинописного текста, включая 65 рисунков, 5 таблиц и списка используемой литературы из 91 наименования.

В первой главе проведен анализ способов правки тонколистовых конструкций, рассмотрены процессы, протекающие в элементах сварных конструкций при действии внешних сил и нагрева, приведены особенности устройств для осуществления ручной и машинной правки. Учитывая необходимость определения величин деформаций перемещения тонколистовых оболочек кузовов, проведен анализ способов измерения волнистости на основе применения разностных методов измерений.

Работами Г.А. Николаева, С.А. Куркина, В.А. Винокурова, В.М. Сагалевича, В.С. Михайлова, С.А. Кузьмина, а также зарубежных авторов Е. Куме, С. Томото, С. Грина, Ж. Доерффера и др. разработаны способы предотвращения и устранения остаточных деформаций сварных конструкций. Показано, что устранение деформаций

перемещения в тонколистовых конструкциях может быть достигнуто применением термической правки, воздействием внешних сил, а также сочетанием различных видов воздействий. В зависимости от причин, вызывающих появление деформаций, правку разделяют на способы, устраняющие только сварочные деформации, и способы, устраняющие как сварочные, так и другие технологические деформации. В области вагоностроения имеются положительные результаты использования внешних сил для устранения сварочных деформаций.

Систематизация различных способов и устройств для осуществления правки показала, что с точки зрения устранения сварочных и других технологических деформаций тонколистовых конструкций вагонов и механизации процесса, целесообразно использовать комбинированные способы правки, сочетающие одновременное воздействие на сварной узел внешних растягивающих сил и нагрева.

Реализация таких способов, названных термодеоформационными, во многом определяется этапом осуществления правильных работ в общем технологическом процессе изготовления кузовов вагонов. Выбор же оптимального этапа, режимов правки и устройств для осуществления требует знания величины и характера несовершенств поверхности изделия последовательно на каждом этапе изготовления.

Поставленная в работе цель потребовала решения следующих задач:

1. Разработки математического аппарата для реализации способа измерений волнистости, основанного на разностном принципе, и создание автоматизированной системы для оценки уровня деформаций узлов кузовов вагонов.

2. Статистического исследования деформаций обшивки кузовов пассажирских вагонов на различных стадиях изготовления с целью нахождения оптимальных этапов для осуществления правильных работ и параметров волнистости.

3. Разработки и теоретического исследования термодеоформационного способа правки, включающего в себя:

- исследование механизма устранения остаточных деформаций гофрированных панелей;
- исследования влияния режимов правки на изменение сварочных

напряжений и деформаций, а также других технологических деформаций.

4. Разработки экспериментальных установок, постановки экспериментов и обобщения результатов исследований.

5. Разработки конструктивных схем и оборудования для реализации термдеформационного и тепловых способов правки при изготовлении тонколистовых сварных кузовов цельнометаллических вагонов.

Во второй главе рассматривается методика измерений волнистости длиномерных изделий, приведено математическое обоснование способа измерений и данные статистических исследований волнистости обшивки кузовов вагонов производства Рижского вагоностроительного завода. На основании данных исследований устанавливаются оптимальный этап осуществления правки и параметры волнистости обшивки кузовов вагонов.

Для реализации измерения волнистости длиномерных изделий применена известная схема устройства, основанная на разностном принципе измерений. Устройство представляет собой основание на двух опорах и датчик, закрепленный между опорами основания. При перемещении устройства по контролируемому профилю (рис. I.) датчик регистрирует изменение расстояния между профилем и основанием в виде функции $\delta'(x)$. Получение искомого профиля $y(x)$ связано с преобразованием зарегистрированного сигнала $\delta'(x)$. Однако, известные способы таких преобразований обеспечивают лишь приближенное восстановление первообразной $y(x)$, удовлетворительное для низких гармоник, длины волн которых существенно превышают базу устройства L . При расположении датчика в средней части основания, устройство нечувствительно к гармоникам с длинами волн, равными половине базы каретки, или составляющей от нее целую долю.

Для обеспечения равноточности измерений в заданном диапазоне контролируемых гармоник разработан новый метод определения первообразной. Суть метода заключается в том, что зарегистрированный сигнал $\delta'(x)$ преобразуется по Фурье в виде конечного числа комплексных гармоник. Каждая гармоника зарегистрированного сигнала $\delta'(x)$ связана с искомой гармоникой входного сигнала выражением $\delta'(x) = e^{2\pi j f x} G(2\pi j f)$. Функция $G(2\pi j f)$ в комп-

лексной форме отражает амплитудно-частотную характеристику устройства и находится из формулы:

$$G(2\pi f) = e^{-2\pi f \ell} \left(1 - \frac{\ell}{L}\right) + e^{2\pi f(L-\ell)} \frac{\ell}{L} - 1, \quad (I)$$

где ℓ — расстояние от опоры до датчика;
 L — расстояние между опорами;
 f — частота, равная обратной величине длины волны гармоника.

Для нахождения $y(x)$ выполняется прямое преобразование Фурье, $\Delta(2\pi f) = \int \delta(x) e^{-2\pi f j x} dx$, затем с помощью выражения (I) находится преобразование Фурье для искомой функции $y(2\pi f) = \frac{\Delta(2\pi f)}{G(2\pi f)}$, а с помощью выражения обратного преоб-

разования Фурье $y(x) = \int_{f_N}^{f_B} y(2\pi f) e^{2\pi f j x} df$, сама искомая функция.

Поскольку нахождение искомой функции связано с операцией деления на $G(2\pi f)$, то необходимо, чтобы на заданном интервале $f_N < f < f_B$ выполнялось требование $|G(2\pi f)| > 0$. Проведенное в диссертации исследование, позволило определить оптимальные параметры устройств ℓ, L , исходя из заданного граничного диапазона f_B, f_N контролируемой волнистости.

Для измерения волнистости обшивки кузовов вагонов разработано устройство, позволяющее проводить запись сигнала на магнитную ленту. Особенностью конструкции устройства является наличие узла коммутатора-отметчика, позволяющего проводить измерения при произвольной скорости движения устройства. Коммутатор-отметчик через равные отрезки пути вырабатывает прямоугольные электрические импульсы, что дает возможность непрерывный процесс $\delta(x)$ представить в дискретной форме. Частота дискретизации f_K сигнала $\delta(x)$ определялась в соответствии с теоремой Котельникова и принималась исходя из условия $f_K \geq \frac{f_B}{2}$, где f_B — высшая граничная гармоника измеряемой волнистости.

Для регистрации волнистости использовались типовые тензометрические приборы и оборудование: магнитограф М-036, тензостанция ТУП2, преобразователь "аналог-код" типа Ф 733/2, генератор импульсов Г5-15.

С помощью данной системы проведен комплекс исследований

по изучению величины и характера волнистости последовательно на каждом этапе изготовления десяти кузовов пассажирских вагонов электро- и дизель-поездов производства Рижского вагоностроительного завода.

Исследованиями установлено, что волнистость обшивки носит нерегулярный характер и, следовательно, ее исследование должно осуществляться методами теории случайных процессов. Поэтому основными характеристиками погрешности, используемыми в работе, являлись характеристики случайного процесса - среднее квадратическое отклонение, плотность вероятности и спектральная плотность. Обработка экспериментальных данных показала, что волнистость по обшивке кузовов в продольном направлении может рассматриваться как стационарный эргодический процесс. Эргодичность и стационарность позволили найти статистические характеристики распределений путем осреднения результатов измерений, как по длине каждой реализации, так и осреднением по множеству реализаций.

Приведенный в диссертации анализ данных статистических исследований, показывает, что деформации волнистости обшивки кузовов вагонов возникают уже на начальной стадии изготовления заготовок и связаны с технологическими процессами при гибке, штамповке, транспортировке, а также складировании деталей.

Наибольшее приращение уровня деформации волнистости обшивки (до 90%) возникает на стадии сборки и сварки крупногабаритных узлов кузовов вагонов. Деформации на данных этапах появляются в результате воздействия термомеханического цикла сварки, силового воздействия оснастки, а также, как результат подгоночных операций, связанных с отклонением размеров от номинальных. Сварочные деформации составляют около 50% от общих деформаций узлов.

Анализ полученных распределений позволил установить, что наиболее оптимальным этапом осуществления правильных работ является этап после сборки и сварки крупногабаритных узлов кузовов вагонов (боковых стен, крыши). На этом этапе будет подлежать правке до 90% всех деформаций, возникающих при изготовлении кузовов вагонов. При отработке устройств для осуществления правки расчетная неровность должна иметь минимальную волну 0,25 м при максимальной амплитуде 10 мм.

В третьей главе разрабатывается термдеформационный способ правки крупногабаритных узлов вагонов, таких, как боковые стены. Исследуется механизм процессов устранения технологических деформаций волнистости обшивки кузовов вагонов и закономерности изменения сварочных деформаций в результате термдеформационного воздействия на различных режимах. На основании проведенных исследований устанавливаются расчетные значения режимов термдеформационной правки.

Сущность процесса термдеформационной правки состоит в одновременном воздействии на сварной узел растягивающих усилий, приложенных как в плоскости обшивки, так и перпендикулярно ей, а также тепловых и охлаждающих полей. Термдеформационная правка может быть реализована с полным или частичным нагревом обшивки. Полный нагрев может быть осуществлен одновременно по всей поверхности обшивки или нагревом движущимся тепловым полем от одного края изделия к другому.

Недостатком правки растяжением с полным нагревом являются трудности обеспечения нагрева, а также большие энергозатраты, связанные с нагревом всего изделия. В связи с этим разработан способ правки крупногабаритных конструкций с использованием частичного нагрева изделия.

Особенность разработанного способа состоит в следующем: изделие подвергают одновременному воздействию нагрева, растяжения и охлаждения. Тепловыми полями, перемещающимися от начала изделия к концу его, одновременно воздействуют на все находящиеся в сечении гофры. Охлаждающие поля перемещаются одновременно с тепловыми, причем, одно охлаждающее поле предназначено для ограничения зон нагрева и воздействует на плоские элементы обшивки, находящиеся между нагреваемыми гофрами, а другое - производит охлаждение гофров после нагрева. Воздействие нагрева и охлаждения на обшивку сопровождается поджатием ее к плоскости. Усилия, обеспечивающие поджатие обшивки к плоскости, также перемещаются вдоль изделия синхронно с тепловыми и охлаждающими полями. Силы растяжения обшивки действуют постоянно на протяжении всего процесса правки и приложены к ее концам.

Изучение механизма устранения технологических деформаций заключалось в оценке воздействия различных усилий растяжения,

температур нагрева, а также установлению количественных и качественных критериев обеспечения правки в зависимости от величины и формы искривлений гофрированной обшивки.

Для малоуглеродистых и нержавеющей сталей типа 12Х13Г18Д параметр внешнего растягивающего усилия должен отвечать условию:

$$B = 1 - (1,5 \div 1,8)K, \text{ где } B = \frac{\sigma_{\text{вн}}}{\sigma_T}; \quad K = \frac{F_H}{F_{\text{сеч}}} \quad (2)$$

$\sigma_{\text{вн}}, \sigma_T$ — напряжение растяжения и предела текучести материала;
 $F_H, F_{\text{сеч}}$ — площади поперечных сечений нагреваемых зон и всего изделия.

Температура нагрева гофрированных элементов определяется исходя из формы искривления обшивки, физико-механических свойств материала и конструктивных особенностей гофрированной обшивки. Установлено, что устранение технологических деформаций при термомодеформационном способе правки с частичным нагревом обеспечивается за счет возникновения пластического шарнира в поперечных сечениях подкрепляющих элементов, возникающего как результат взаимодействия термических напряжений и напряжений от внешней нагрузки.

Термомодеформационное воздействие на сварной узел, наряду с устранением технологических деформаций, приводит также к снижению, а в ряде случаев, и к полному устранению остаточных деформаций, вызванных сваркой. С целью отработки параметров термомодеформационной правки исследовано влияние нагрева и растяжения сварных пластин на изменение остаточных сварочных деформаций и напряжений. Оценка изменения сварочных деформаций и напряжений проводилась для плоских прямоугольных пластин с применением стержневых и смешанных расчетных схем.

С помощью стержневых расчетных схем изучались закономерности изменения сварочных напряжений и деформаций при одноосном напряженном состоянии, а смешанных — при двухосном напряженном состоянии.

В основе построения стержневых расчетных схем использовался метод схематизации эпюры сварочных напряжений, разработанный профессором В.А.Винокуровым. В результате решения упругопластической задачи деформаций стержневой системы, установлено, что снижение остаточных напряжений пропорционально параметру внешней

растягивающей нагрузки, параметру понижения предела текучести материала при нагреве и обратно пропорционально параметру изменения модуля упругости.

Для оценки изменения плосконапряженного состояния сварных пластин использовалась смешанная основная система, состоящая из пластинок и стержня. При образовании расчетной схемы учитывалось, что ширина зоны активных напряжений пластин обычно небольшая величина по сравнению с ее длиной, поэтому в основной системе зона активных напряжений представлена в виде стержня. Части же пластин, примыкающие к зоне упругопластических деформаций, представлялись как отдельные пластинки (рис.2.). Решение упругопластической задачи выполнялось в два этапа. На первом этапе отыскивались контактные усилия взаимодействия между стержнем и пластинками, что позволило определить разность деформаций между пластинками и стержнем по линии контакта. Отыскание контактных усилий взаимодействия проводилось с использованием метода П.Ф.Папковича, основанного на решении плоской задачи теории упругости в тригонометрических рядах. Разность деформаций по линии контакта пластинок и стержня определялась из выражений:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sum_n g_n \left(\frac{1}{2b_{np}} - c_n \right) \sin \alpha_n x,$$

где

$$c_n = \frac{(A_{1,n} - A_{2,n})[K_{2,n} - (2+M)]M_{1,n} + M_{1,n}M_{2,n}(D_{1,n} + D_{2,n})}{(A_{1,n} - A_{2,n})(K_{1,n} - K_{2,n}) - (D_{1,n} + D_{2,n})(M_{1,n} + M_{2,n})} - \frac{M_{2,n}[K_{1,n} - (2+M)](A_{1,n} + M) + M_{1,n}[K_{2,n} - (2+M)](A_{1,n} + M)}{(A_{1,n} - A_{2,n})(K_{1,n} - K_{2,n}) - (D_{1,n} + D_{2,n})(M_{1,n} + M_{2,n})}, \quad (3)$$

g_n - коэффициенты Фурье усредненного усилия;

$2b_{np}$ - приведенная ширина зоны упругопластических деформаций.

Функции $A_{1,n}, A_{2,n}, \dots, K_{1,n}, K_{2,n}$ вычисляются по формулам типа:

$$A_{1,n} = - \frac{(1 - e^{-4U_{1,n}})^2 + 16U_{1,n}^2 e^{-4U_{1,n}}}{(1 - e^{-4U_{1,n}})^2 - 16U_{1,n}^2 e^{-4U_{1,n}}}$$

Для решения упругопластической задачи изменения напряженного состояния сварной пластинки использовался метод упругих решений А.А.Илькшина.

При нахождении контактных усилий взаимодействия между пластинками и стержнем с переменным модулем упругости использовался метод смягчения граничных условий – точечный метод, который состоит в том, что граничные условия удовлетворяются не во всех точках границы тела, а лишь в целесообразно выбранных.

Принимая количество точек контакта, равное числу удерживаемых гармоник, получаем систему линейных уравнений, решение которой при каждом последовательном приближении позволяет найти контактные усилия взаимодействия.

Результаты вычислений показывают, что наибольшие касательные напряжения возникают по контактирующим кромкам пластин. При этом максимальные значения напряжений находятся в краевых сечениях пластин. По мере удаления от концов пластин напряжения уменьшаются и в средней части близки к нулевым значениям. Наибольшие нормальные продольные напряжения возникают по кромке пластин в тех же точках, что и касательные, однако, при смещении расчетных сечений к серединам пластин происходит лишь некоторое их снижение. На расстояниях от концов пластины, равных примерно ширине пластинок, напряжения выравниваются как по поперечным, так и продольным сечениям пластинок.

Результаты расчетов показали, что воздействие нагрева и растяжения вызывает значительное снижение остаточных напряжений уже при температурах 200–300°C и напряжениях от растягивающих нагрузок 100–200 МПа.

В четвертой главе рассмотрены методика и результаты экспериментального исследования термомодеформационного способа правки, а также приведены результаты разработок нового оборудования для правки гофрированной обшивки кузовов вагонов.

Эксперименты выполнялись на двух установках термомодеформационной правки с применением полного и частичного нагрева. Стабильность режима правки в установках обеспечивалась средствами автоматики и применением специальных конструкций нагревателей, реализующих электронагрев.

Замер величин относительных деформаций после наплавки, а также после воздействия нагрева и растяжения проводился с помощью деформометра МВТУ им. Баумана с базой измерения 300 мм. Для возможности проведения измерений относительных деформаций искривленных

образцов деформометр оснащен дополнительным индикатором, измеряющим стрелку прогиба образца в средней части базы. Увеличение базы деформометра позволило применить индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Измерения относительных деформаций сварных образцов после термдеформационного воздействия проводилось в зоне протекания упругих деформаций.

Результаты испытаний по исследованию изменений остаточных деформаций в образцах показали, что одновременное воздействие растяжения и нагрева приводит к интенсификации процесса протекания пластических деформаций и, как следствие этого, снижению остаточных как сварочных деформаций напряжений, так и других технологических деформаций, не связанных со сваркой.

Исследованиями установлено, что одно и то же снижение остаточных напряжений может быть достигнуто при различных сочетаниях растягивающих напряжений от внешней нагрузки и температур нагрева. В целом нашло удовлетворительное подтверждение выражение изменения сварочных напряжений, полученное теоретически:

$$\lambda = \frac{\theta(T^0) - \beta}{\gamma \lambda(T^0)} \quad 0 \leq \lambda \leq 1,$$

где λ — показатель, характеризующий степень снижения остаточных напряжений;

$\theta(T^0)$, $\lambda(T^0)$ — безразмерные параметры, характеризующие изменение предела текучести и модуля упругости при нагреве;

$\beta = \frac{\sigma_{\text{вн}}}{\sigma_T}$ — параметр внешней нагрузки;

$\gamma = \frac{\sigma_1}{\sigma_T}$ — соотношение приведенного значения напряжения в зоне упругопластических деформаций к пределу текучести материала σ_T .

Проведенные эксперименты позволили отработать технологию правки, уточнить оптимальные параметры термдеформационного способа правки.

На основе проверки экспериментального оборудования разработаны установки для промышленного использования. Установки предназначены для проведения машинной правки боковых стен кузовов вагонов с применением частичного нагрева и доводочных операций по правке обшивки кузовов на завершающем этапе изготовления. Разработанные

установки защищены авторскими свидетельствами и решениями Госкомитета. Отмена малоэффективных и трудоемких ручных операций ударной правки и замена их машинной термомодеформационной с применением разработанного оборудования обеспечивают экономическую эффективность.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан термомодеформационный способ правки тонколистовых сварных конструкций, заключающийся в одновременном воздействии на конструкцию нагрева и растяжения.

Оптимальность выбора режимов правки применительно к конструкциям из низкоуглеродистых и нержавеющей сталей имеет научное экспериментальное и теоретическое подтверждение и в целом заключается в том, что в основе выбора параметров термомодеформационных способов правки тонколистовых конструкций положено соответствие режимов устранения как сварочных деформаций и напряжений, так и технологических деформаций.

Реализация термомодеформационного способа правки может осуществляться с использованием частичного нагрева (например, боковых стен вагонов) и полного нагрева для малогабаритных элементов.

2. На основе решения упругопластической задачи с использованием разработанного алгоритма методом итераций в тригонометрических рядах произведена оценка изменения сварочных напряжений в пластинах, подвергаемых нагреву и растяжению. Показано, что воздействие на пластину со сварным швом полного нагрева и растяжения приводит к уменьшению значений нормальных и касательных напряжений, причем, в концевых зонах пластин наблюдается смещение областей максимума касательных и нормальных напряжений в направлении к краю пластины.

3. Исследование влияния параметров термомодеформационной правки на изменение остаточных сварочных напряжений и деформаций показало, что степень снижения сварочных напряжений рассчитывается исходя из значений предела текучести и модуля упругости при нагреве, величины напряжения растяжения и первоначального уровня остаточных напряжений.

Полное снятие остаточных напряжений в пластинах при полном

нагреве происходит при нагрузках, обеспечивающих в сечении напряжения предела текучести материала для заданной температуры нагрева.

4. Установлено, что устранение технологических деформаций тонколистовых подкрепленных панелей при термодформационном способе правки с частичным нагревом обеспечивается за счет возникновения пластического шарнира в поперечных сечениях продольных подкрепляющих элементов, возникающего в результате взаимодействия термических напряжений и напряжений от внешней нагрузки.

5. Установлено, что при термодформационной правке гофрированных панелей сварной тонколистовой конструкции на режимах, соответствующих нагреву до температуры $240-350^{\circ}\text{C}$ и приложению нагрузки, обеспечивающей напряжения растяжения $0,7-0,8$ предела текучести, обеспечивается правка конструкций, при которой остаточная волнистость находится в пределах I мм/пог.м.

6. Разработана методика автоматизированного способа измерения волнистости протяженных плоских и цилиндрических панелей, основанная на разностном принципе, состоящая в том, что сигнал измерительного устройства, характеризующий форму поверхности деформированной обшивки, представляется в виде конечного числа комплексных гармоник, каждая из которых преобразуется в соответствии с изменением АЧХ устройства.

С помощью данной методики с использованием автоматизированной системы проведен статистический анализ деформаций кузовов вагонов, позволивший выявить количественные соотношения сварочных и технологических деформаций.

Установлено, что до 90% общей величины деформаций обшивки вагонов возникает на стадии изготовления крупногабаритных узлов, в частности, боковых стен и крыш. При этом 50% от общей величины деформации составляют сварочные, возникающие после воздействия термодформационного цикла сварки, а около 50% технологически со сваркой не связаны.

7. Исследован спектральный состав волнистости обшивки вагонов на различных этапах изготовления. Установлено, что спектры волнистости обшивки от технологических деформаций длиномерных элементов лежат в диапазоне длин волн от 6 до 10 метров. Сварка узлов вызывает появление волнистости в диапазоне длины волн от 0,25 до 2 метров.

8. Разработан ряд опытно-промышленных установок для термомодеформационной правки узлов вагонов. Планом реконструкции Рижского вагоностроительного завода предусмотрено две позиции для правки боковых стен вагонов разработанным способом. Общий экономический эффект от внедрения оборудования термомодеформационной правки составляет 200 т.р.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Подсосов Е.В., Органов Ю.П., Мейстер А.М. Термомодеформационный способ правки тонкостенных элементов кузовов пассажирских вагонов. - Транспортное машиностроение. - М., 1976, 32 с. (сб./НИИИНФОРМТЯЖМАШ; 5-76-18).

2. Подсосов Е.В. Термомодеформационный способ устранения остаточных сварочных напряжений: Труды/ВНИИ вагоностроения. - Вып.32. - М., 1977. - 128 с., с.108-113.

3. Подсосов Е.В., Макаров В.П. Автоматизированный способ контроля величин деформаций сварных конструкций железнодорожных вагонов. - В сб. Механизация и автоматизация производства сварных конструкций: Тезисы докладов и сообщений Всесоюзного научно-технического совещания. - Пенза, 1977. - 94 с.

4. Подсосов Е.В., Евтушенко В.Т. Расчет изменений сварочных напряжений в пластине при нагреве и растяжении методом упругих решений. - Государственный фонд алгоритмов и программ, инв. № 002286/ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. - М., 1977. - 56 с.

5. Подсосов Е.В., Богданов В.П. Устранение погиби кузовов из нержавеющей стали. - Повышение прочности вагонов. - М., 1980, с.17-20 (Реф.сб./ЦНИИТЭИТЯЖМАШ; 5-80-17).

6. А.С. 784965 (СССР). Пистолет для нагрева листовых деталей. /КФ ВНИИВ, КВЗ; Авт. изобрет. Е.В.Подсосов, В.П.Макаров, А.М.Макаров, В.В.Вершинский. - Заявл. 05.01.79. № 27100891/25-27; Опубл. в Б.И., 1980, № 45; М. кл.³ В 21 Д1/06.

7. А.С. 790435 (СССР). Распыляющее устройство./КВЗ, КФ ВНИИВ; Авт. изобрет. Е.В.Подсосов, В.А.Мазов, А.М.Макаров. - Заявл. 10.05.79. № 2765635/23-23; М. кл.³ В 05 В 7/32, В 05 В 1/08.

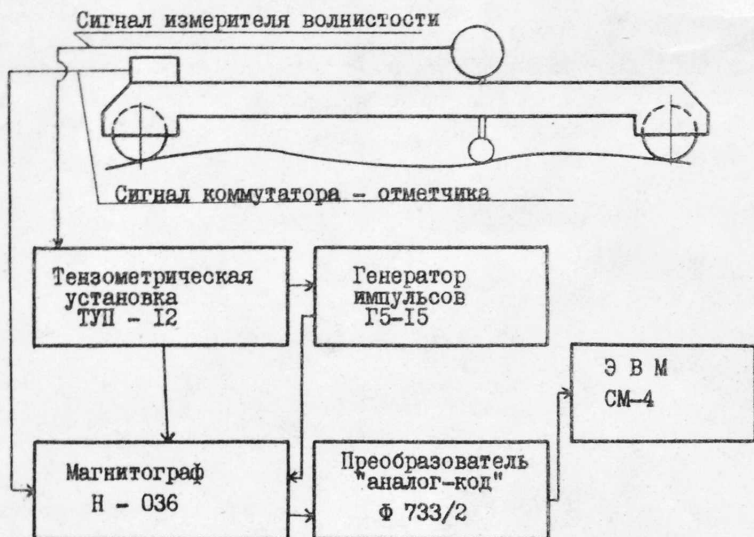


Рис.1. Блок-схема автоматизированного способа измерения волнистости

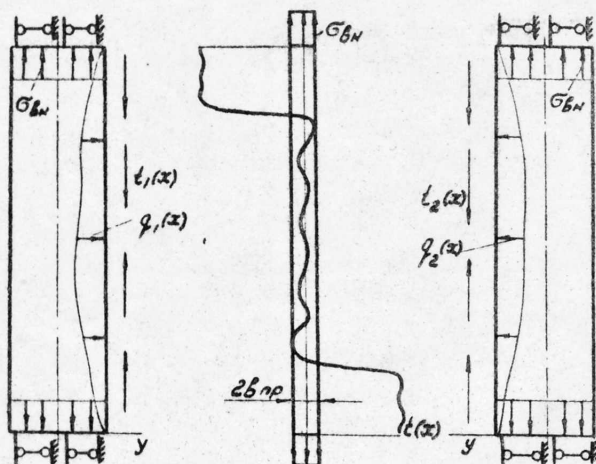


Рис.2. Расчетная схема сварного элемента для определения изменения сварочных напряжений при нагреве и растяжении.