



УДК 621.791.09:621.789

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ПРАВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК И ВАЛОВ С ДЕФОРМАЦИЯМИ ИСКРИВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ

О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук, А. Ф. МУЖИЧЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведено численное исследование деформированного состояния цилиндрических оболочек при локальном нагреве с использованием термопластического анализа и метода конечных элементов. Разработаны расчетные алгоритмы и методика определения параметров тепловой правки на основе приближенного метода функции усадки. Методика использована при тепловой правке длинных цилиндрических оболочек с общими деформациями искривления продольной оси, вызванными кольцевыми стыковыми швами, а также правкой длинных шнековых валов с деформациями продольного прогиба.

Ключевые слова: сварные цилиндрические оболочки, деформации, тепловая правка, численное исследование, расчетные алгоритмы, методика

В результате сварочного нагрева при изготовлении длинных цилиндрических оболочек или под влиянием различных воздействий при эксплуатации могут возникать недопустимые общие деформации искривления продольной оси. Эти деформации вызваны либо локальным воздействием, например, изломом оси оболочки от сварки кольцевого шва, либо распределенным по длине оболочки воздействием, которое приводит к равномерному ее изгибу. Одним из способов снижения таких деформаций до приемлемого уровня может быть тепловая правка [1, 2], которая применительно к конструкциям цилиндрических оболочек до настоящего времени мало изучена и не на практике не использовалась.

С целью изучения возможности применения тепловой правки для цилиндрических конструкций, а также определения оптимальных параметров нагрева проведено численное исследование деформированного состояния (остаточных пластических деформаций и общего формоизменения) цилиндрических оболочек при локальном нагреве с использованием термопластического анализа и метода конечных элементов (МКЭ) [3].

Однако прогнозирование общих деформаций искривления оси длинной цилиндрической оболочки в результате локального нагрева на основе общего подхода теории термоупругопластичности и МКЭ является в настоящее время достаточно сложной задачей, требующей создания трехмерной математической модели и значительных вычислительных ресурсов при поиске решения. Но поскольку при выполнении тепловой правки выбор параметров теплового воздействия надо осу-

ществлять оперативно, желательно в режиме реального времени, то разработаны расчетные алгоритмы и методика определения параметров тепловой правки на основе приближенного метода функции усадки [4].

С помощью указанной методики успешно проведена реальная тепловая правка длинных цилиндрических оболочек с общими деформациями искривления продольной оси, вызванными стыковой сваркой кольцевых швов, а также длинных шнековых валов с деформациями продольного прогиба.

Численное исследование деформированного состояния цилиндрических оболочек при локальном нагреве. Исследование проводили применительно к условиям тепловой правки длинных шнековых валов с деформациями продольного прогиба. Поскольку исследуемые валы являются пустотелыми, то в качестве математической модели выбрана цилиндрическая оболочка (рис. 1) с внутренним диаметром, соответствующим внутреннему диаметру вала ($D_{\text{вн}} = 50$ мм), ее наружный диаметр задан равным среднему диаметру профиля шнека ($D_{\text{нар}} = 92$ мм). Для сокращения времени расчета длину модели цилиндрической оболочки из нержавеющей стали 20Х13 ограничи-ли 100 мм. Нагрев полосы на наружной поверхности оболочки имитировали тепловым потоком, распределенным по длине полосы. Максимальная температура нагрева составляла 650 °С.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета распределения температуры на наружной поверхности оболочки (рис. 2, а) и в ее поперечном сечении по толщине стенки (рис. 2, б) в момент окончания нагрева полосы длиной $L_q = 90$ мм и шириной $B_q = 10$ мм. Мощность распределенного источника нагрева $P_q = 27$ кВт, время нагрева $t_q = 30$ с, максимальная его температура $T_{\text{max}} = 600$ °С. В связи со значительной

© О. В. Махненко, А. Ф. Мужиченко, 2007

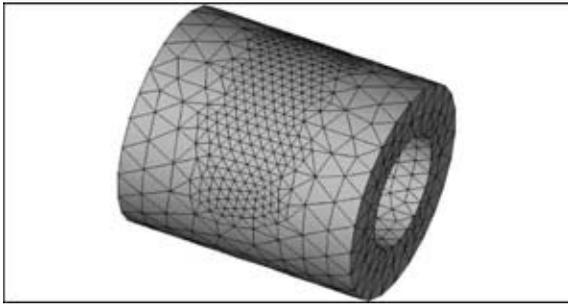


Рис. 1. Модель цилиндрической оболочки с разбиением на конечноэлементную сетку

(21 мм) толщиной стенок оболочки распределение температуры нагрева по толщине стенки было неравномерным (рис. 2, б). Соответственно, как показали эксперименты, в поперечном сечении цилиндрической оболочки остаточные напряжения (рис. 3, а) и пластические деформации (рис. 3, б) также распределены неравномерно: они образуются в основном в поверхностном слое стенки оболочки. Общий остаточный прогиб оболочки с некоторым допущением может быть определен на наружной ее поверхности с противоположной стороны от нагрева (рис. 4). Этот прогиб незначительный (до $W = -0,001$ мм), что объясняется высокой жесткостью оболочки и малой длиной модели. По прогибу можно оценить соответствующий угол изгиба оси оболочки $\alpha = 2 \arcsin (W/50) = 4 \cdot 10^{-5}$ рад. По длине вала 2000 мм такой нагрев обеспечивает снижение общего прогиба на 0,02 мм.

Проведена серия расчетных экспериментов по определению остаточного угла α изгиба оси цилиндрической оболочки в зависимости от длины L_q и ширины B_q полосы, а также времени нагрева t_q до максимальной температуры $T_{\max} \approx 650$ °С. Результаты расчета, приведенные в табл. 1, подтверждают, что угол изгиба оси оболочки существенно возрастает при увеличении длины и ширины нагрева, а также времени нагрева до максимальной температуры. Полученные результаты расчета использовали при проведении тепловой

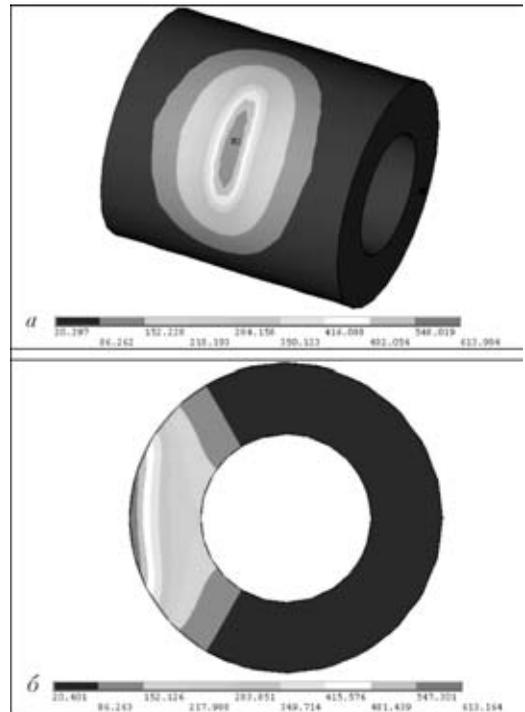


Рис. 2. Распределение температуры в конце полосы нагрева на наружной поверхности оболочки (а) и в ее поперечном сечении по толщине стенки (б)

правки длинных шнековых валов с общими деформациями продольного прогиба.

Расчетная методика определения параметров тепловой правки на основе приближенного метода функции усадки. На рис. 5 приведена схема незамкнутого кольцевого нагрева длинной цилиндрической тонкостенной оболочки с радиусом R и толщиной стенки δ . Здесь AB — полоса нагрева, обеспечивающего поперечную усадку от полосы нагрева $\Delta_{\text{поп}}$ в свободном состоянии, штриховой линией выделена зона шириной D , где действуют поперечные усадочные усилия растяжения:

$$N_{xx} = \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \sigma_{xx} dz, \quad N_{xx} = \frac{E}{1 + \nu} [\epsilon_{xx} + \nu \epsilon_{\beta\beta} - \epsilon_{xx}^P], \quad (1)$$

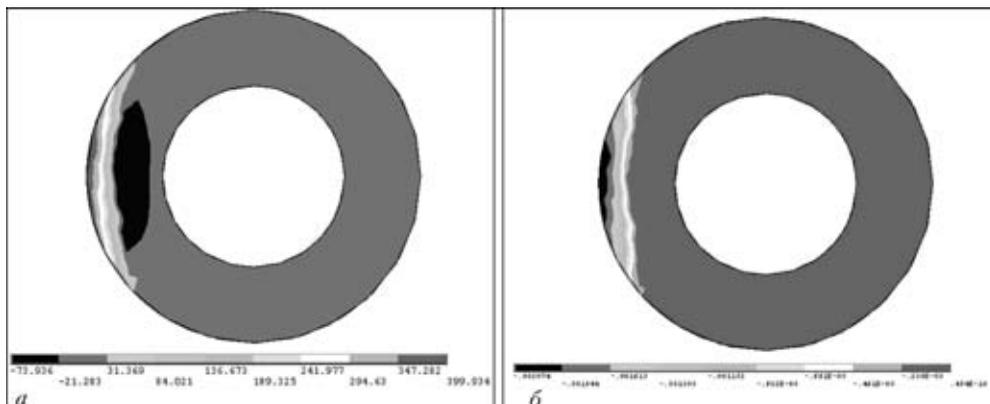


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений (а) и пластических деформаций (б) вдоль полосы нагрева в поперечном сечении оболочки

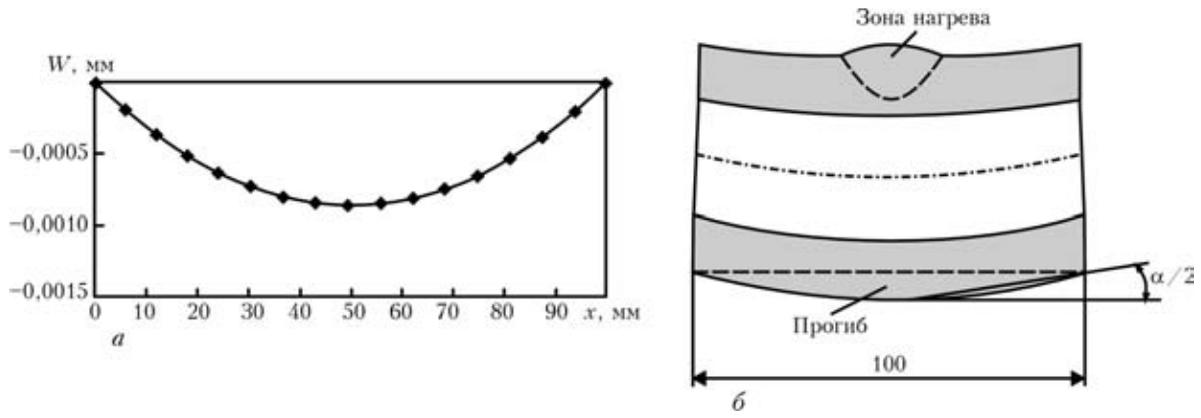


Рис. 4. Кривая общего прогиба W цилиндрической оболочки на ее наружной поверхности с противоположной стороны от нагрева (а) и схема общего прогиба модели оболочки (б); x — координата вдоль образующей оболочки

Таблица 1. Результаты расчета угла изгиба оси оболочки α при различных режимах тепловой правки

№ правки	β , град	L_q , мм	B_q , мм	P_q , кВт	t_q , с	T_{max} , °C	$W_{max} \cdot 10^3$, мм	$\alpha \cdot 10^5$, рад
1	25	40	10	1,280	30	640	0,16	0,64
2	38	62	10	2,340	10	649	0,21	0,84
3	38	62	10	1,500	30	667	0,45	1,80
4	38	62	10	1,500	60	642	0,67	2,70
5	56	90	10	2,520	30	640	0,35	1,40
6	56	90	10	2,025	61	632	0,72	2,90
7	56	90	20	2,700	61	650	1,00	4,00

Примечание. β — угол, определяющий длину полосы нагрева.

где ϵ_{xx} и $\epsilon_{\beta\beta}$ — деформации соответственно по оси x и окружности на средней поверхности оболочки $z = 0$; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона;

$$\epsilon_{xx}^P \approx -\frac{\Delta_{\text{поп}}}{b} \quad (2)$$

свободная деформация усадки на базе ширины b зоны пластических деформаций.

Если пренебречь величиной $\nu\epsilon_{\beta\beta}$ и использовать гипотезу плоских сечений, т. е.

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{xx}^0 + \chi R \cos \beta, \quad (3)$$

где ϵ_{xx}^0 — деформация средней поверхности; $\chi = -\partial^2 W / \partial x^2$ — кривизна оси оболочки.

Тогда уравнения равновесия для сечения $x = \text{const}$ имеют вид

$$\int_0^{2\pi} N_{xx} d\beta = \frac{E}{1+\nu} [2\pi\epsilon_{xx}^0 - 2\alpha\epsilon_{xx}^P] = 0;$$

$$\int_0^{2\pi} N_{xx} R \cos \beta d\beta = 2\frac{E}{1+\nu} [\chi R \frac{2\pi}{2} - \epsilon_{xx}^P R \sin \beta] = 0.$$

Отсюда

$$\epsilon_{xx}^0 = \epsilon_{xx}^P \frac{\beta}{\pi}; \quad \chi = \frac{2\epsilon_{xx}^P \sin \beta}{\pi R}. \quad (4)$$

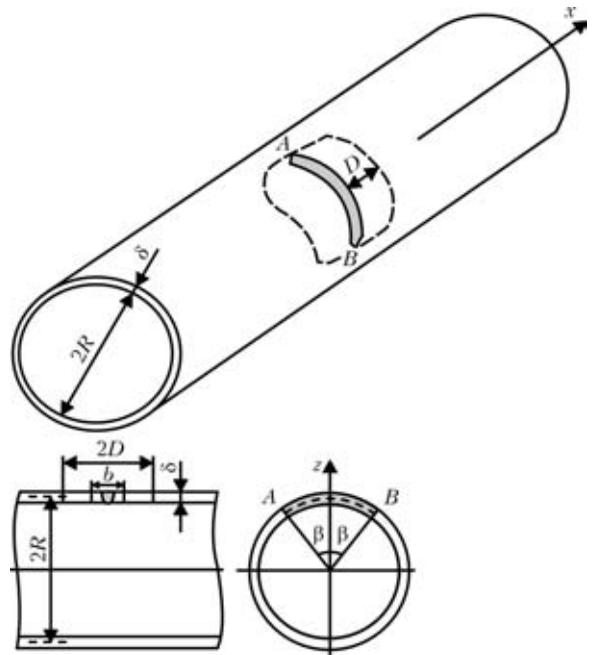


Рис. 5. Схема незамкнутого кольцевого нагрева длинной цилиндрической тонкостенной оболочки (см. объяснения в тексте)

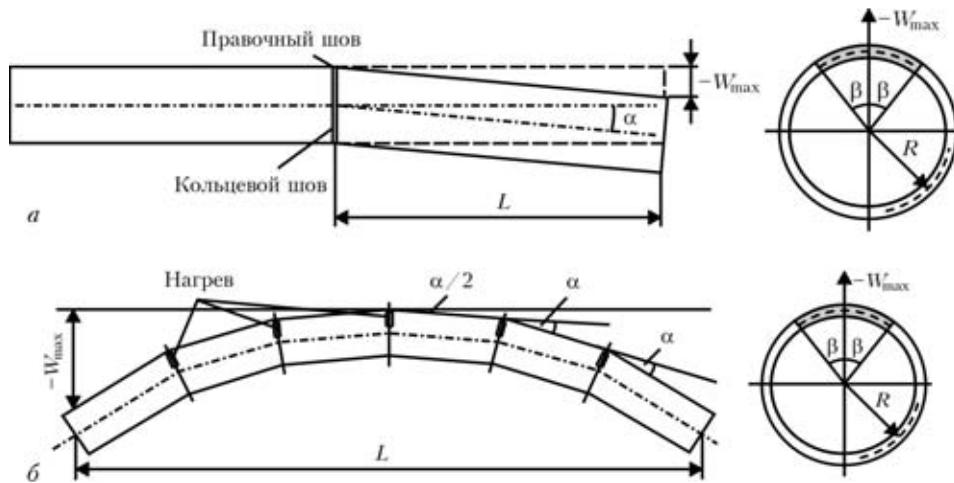


Рис. 6. Схематическое изображение тепловой правки цилиндрической оболочки путем нагрева в местах изгиба равномерного по длине деформации продольного изгиба (а) и ступенчатого из N полос нагрева (б)

Кривизна χ оси оболочки является функцией координаты x .

Соответственно

$$\chi = \chi(x) = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Искомый угол α изгиба оси оболочки составит

$$\alpha = \frac{\partial W}{\partial x} = -\int_{-D}^D \chi(x) dx = \frac{-2\varepsilon_{xx}^P \sin \beta}{\pi R} 2D. \quad (6)$$

Используя для ε_{xx}^P зависимость (2) и принимая $b = \delta K_1$ и $D = \delta K_2$, получаем

$$\alpha = \frac{2\Delta_{\text{поп}} \sin \beta}{\delta K_1 \pi R} 2\delta K_2 = \frac{4\Delta_{\text{поп}} \sin \beta}{\pi R} K_3, \quad (7)$$

где $K_1 \dots K_3 = K_2/K_1$ — расчетно-экспериментальные коэффициенты.

Алгоритм выбора параметров нагрева при тепловой правке. Если цилиндрическая оболочка имеет продольный изгиб, вызванный каким-либо локальным воздействием (рис. 6, а), например изломом оси оболочки от сварки кольцевого шва, то правку необходимо выполнять путем нагрева полосы по месту излома оси. Расположение этого нагрева выбирается таким образом, чтобы угловая координата середины нагрева была равна координате максимального выгиба вала $-W_{\text{max}}$. При этом длина полосы нагрева определяется через угол β по следующей зависимости:

$$\sin \beta = \frac{\pi R}{4\Delta_{\text{поп}} K_3} \alpha, \quad (8)$$

где $K_3 \approx 1 \dots 2$; $\alpha = W_{\text{max}}/L$.

Если цилиндрическая оболочка имеет равномерный по длине изгиб с максимальным прогибом W_{max} (рис. 6, б), то правку необходимо выполнять

за счет набора из N полос нагрева, равномерно распределенных по длине L оболочки. При этом длина полос нагрева определяется через угол β по следующей зависимости:

$$\sin \beta = \frac{\pi R}{4\Delta_{\text{поп}} K_3} \frac{4W_{\text{max}}}{L(1 + (N-1)N)}. \quad (9)$$

Тепловая правка цилиндрической оболочки. С применением электронно-лучевой сварки (ЭЛС) и разработанного расчетного алгоритма проведены эксперименты по тепловой правке деформаций искривления оси длинной цилиндрической оболочки из сплава титана ВТ-1, собранной из трех секций длиной 2 м, диаметром 350 мм, с толщиной стенки 6 мм (рис. 7). Поскольку деформации искривления оси могут возникать при сварке стыковых кольцевых швов, предусматривалось править оболочку путем нанесения сварных незамкнутых валиков по месту кольцевого шва. Это, во-первых, не добавляет в оболочке новых зон расплавления и зон термического влияния металла, а во-вторых, как было определено при экспериментальном измерении деформаций, возникающих при ЭЛС пластин, последующие сварные валики имеют близкую поперечную усадку по сравнению с первым валиком, т. е. повторный нагрев практически не снижает эффективность тепловой правки.

Целью эксперимента было проведение апробации разработанной методики тепловой правки общих деформаций искривления оси длинной цилиндрической оболочки и уточнение экспериментальным путем значения коэффициента K_3 в разработанном расчетном алгоритме применительно к данной оболочке и режиму ЭЛС.

В связи с этим по месту стыкового кольцевого шва выполняли незамкнутые кольцевые швы различной длины. Половина длины сварного шва при правке задавалась углом β . Расположение этих



швов выбирали на основании результатов измерения деформаций искривления оси оболочки: угловая координата середины сварного валика равна координате максимального отклонения оболочки со знаком минус. Режим ЭЛС для этих швов выбирали менее мощный, чем штатный режим для сварки стыкового кольцевого шва, чтобы размеры зоны термического влияния не превышали размеров уже существующей зоны, образовавшейся от выполнения стыкового кольцевого шва. Исходя из результатов измерений на плоских образцах выбранному режиму ЭЛС при тепловой правке соответствует поперечная усадка $\Delta_{\text{поп}} = -0,15$ мм.

Для контроля точности сварной цилиндрической оболочки разработана система, позволяющая проводить измерения деформации искривления оси непосредственно в условиях вакуумной камеры. Визуализация измерения деформаций, а также процесса термической правки осуществляется на экране монитора. Отклонение оболочки от прямолинейности измеряли на расстоянии 1800 мм от кольцевого шва. Измерения проводили до выполнения правочного сварного шва и после полного остывания обечайки. Их результаты представлены в табл. 2.

Результаты экспериментов показали высокую эффективность нового способа тепловой правки деформаций искривления оси длинной цилиндрической оболочки, а также подтвердили принятое в разработанном расчетном алгоритме допущение, что $K_3 \approx 1...2$. В табл. 2 представлены экспериментальные значения коэффициента K_3 , полученные по формуле (8) для сварных швов различной длины при правке, из которых видно, что для данной оболочки и выбранного режима сварки при правке коэффициент может быть принят с достаточной точностью равным $K_3 = 1,5$. Таким образом, при определении необходимой длины сварного шва для правки измеренных деформаций искривления оси оболочки можно эффективно использовать разработанный расчетный алгоритм.

Экспериментальные результаты характеризуются повторяемостью с весьма удовлетворительной точностью. Разработанная методика тепловой правки позволяет снизить значительные деформации искривления оси длинных оболочек до необходимого уровня, при этом в большинстве случаев за одну попытку. Впрочем, если в результате первой попытки деформации искривления оси не были снижены до необходимого уровня, то с выполнением последующих сварных валиков, длина которых должна учитывать изменение деформаций, процесс правки будет успешно завершен.

Тепловая правка длинных валов. Общие деформации прогиба длинных (2000 мм) шнековых валов, вызванные неравномерным нагревом в результате аварийной остановки технологического

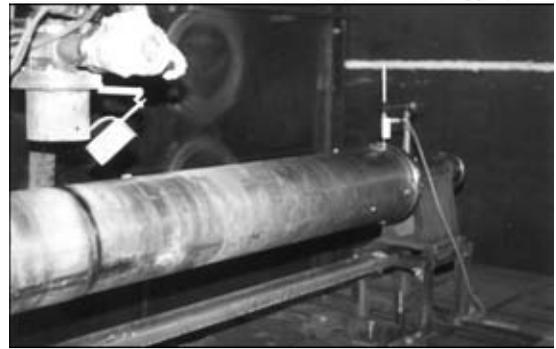


Рис. 7. Тепловая правка длинной оболочки из сплава ВТ-1 с деформациями искривления продольной оси

процесса, были снижены до допустимого значения прогиба (1 мм) с помощью тепловой правки, которую реализовали путем выполнения некоторого количества полос нагрева (600...650 °С) определенной длины, равномерно распределенных по длине вала (см. рис. 6, б). Расположение нагрева выбирали на основании результатов измерения деформаций прогиба оси шнека таким образом, что угловая координата середины нагрева была равна координате максимального прогиба вала $-W_{\text{max}}$. Длина полос нагрева может быть достаточно эффективной при $L_g \approx (0,1...0,2)2\pi R$, но при условии, что она составляет не более половины длины окружности вала ($L_g < \pi R$).

После выполнения серии нагревов измерение прогиба вала (рис. 8) необходимо выполнять только после полного его остывания. Если в результате первой попытки тепловой правки деформации прогиба оси вала не снизились до требуемого значения, то методом последовательного приближения путем дополнительных нагревов процесс правки может быть успешно завершен.

С помощью разработанной методики выполнена тепловая правка двух шнековых валов длиной 2000 мм с максимальными прогибами 4,0 и 2,8 мм (рис. 9). В качестве источника нагрева использовали газопламенную горелку. По приближенным формулам из работы [1] получены значения поперечной усадки для плоского образца

Таблица 2. Экспериментальные данные тепловой правки цилиндрической оболочки

№ правки	β , град	W , мм (до правки)	W , мм (после правки)	Изменение прогиба ΔW , мм	K_3
1	15	1,26	0,50	0,76	1,49
2	15	2,04	1,16	0,88	1,72
3	30	3,16	1,90	1,26	1,28
4	30	2,36	0,79	1,57	1,60
5	60	3,21	0,55	2,66	1,56
6	60	0,75	-2,20	2,95	1,72
7	75	4,14	1,00	3,14	1,65
8	85	4,85	2,04	2,81	1,45



Рис. 8. Измерение прогибов шнековых валов длиной 2000 мм из нержавеющей стали 20Х13



Рис. 9. Выполнение кольцевого незамкнутого нагрева газопламенной горелкой при тепловой правке шнекового вала

из нержавеющей стали толщиной 40 мм в результате соответствующего нагрева газопламенной горелкой, они составляют $\Delta_{\text{поп}} \approx -0,02$ мм. В соответствии с разработанной методикой и формулой (9) для правки вала длиной 2000 мм с прогибом около 3...4 мм необходимо несколько десятков таких нагревов. Результаты тепловой правки валов на практике подтвердили эффективность разработанной методики.

На рис. 10 представлены результаты измерения прогибов по длине валов до и после тепловой правки. После выполнения последней значения прогибов уменьшились соответственно до 0,5 и 0,7 мм, что удовлетворяло допуску (1 мм) на прогиб шнекового вала.

Выводы

1. Численное исследование деформированного состояния (остаточных пластических деформаций

Numerical study of the deformed state of cylindrical shells at local heating has been performed using thermoplastic analysis and finite element method. Calculation algorithms and procedure for determination of the parameters of thermal straightening based on the approximation method of shrinkage function have been developed. The procedure was used in thermal straightening of long cylindrical shells with common distortions of the longitudinal axis caused by performance of circumferential butt welds, as well as straightening long screw shafts with longitudinal deflection deformations.

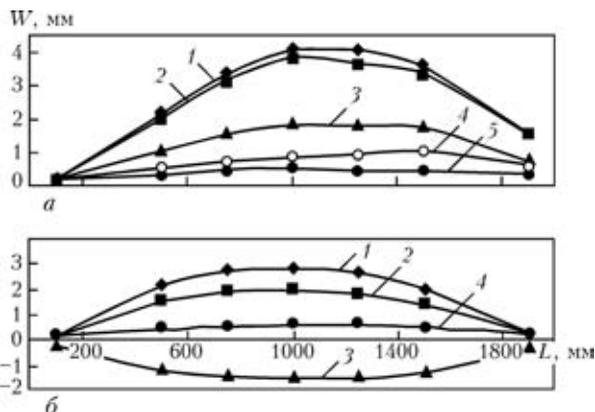


Рис. 10. Результаты измерения прогибов по длине вала № 1 (а) и 2 (б): 1 — до правки; 2 — после 1-й (5 нагревов); 3 — 2-й (10 нагревов); 4 — 3-й (8 нагревов); 5 — 4-й серии нагревов (5 нагревов)

и общего формоизменения) цилиндрических оболочек при локальном нагреве с использованием термопластического анализа и МКЭ показало возможность успешного применения тепловой правки для цилиндрических конструкций с общими деформациями искривления продольной оси оболочки. Однако при этом трудоемкость и временные затраты, необходимые для определения оптимальных параметров нагрева таким методом, очень значительны.

2. Разработанный расчетный алгоритм и методика определения оптимальных параметров тепловой правки на основе приближенного метода функции усадки позволяют при выполнении тепловой правки для устранения деформаций искривления оси цилиндрической оболочки получать решение по выбору параметров теплового воздействия в режиме реального времени.

3. Экспериментальная апробация при тепловой правке общих деформаций искривления оси длинных цилиндрической оболочки и шнековых валов показала эффективность разработанной методики тепловой правки.

1. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 286 с.
2. Михайлов В. С. Правка судовых сварных корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1972. — 253 с.
3. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
4. Numerical methods for the predictions of welding stresses and distortions / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. // S. L.: Harwood Acad. publ., 1999. — 146 p. (Welding and Surfacing Rev: 13, pt. 1).

Поступила в редакцию 17.01.2007