



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОБЕЧАЕК ТУРБИННЫХ ВОДОВОДОВ ГЭС

В. Н. ПАНИН, канд. техн. наук (ОАО ИТЦ «Прометей», г. Чехов, РФ)

Применение электрошлаковой сварки при изготовлении обечай турбинных водоводов гидроэлектростанций сопровождается их формоизменением под действием остаточных сварочных деформаций. Приведены расчетные зависимости формоизменения обечай, учитывающие их геометрические размеры и технологические факторы при изготовлении.

*Ключевые слова:* электрошлаковая сварка, турбинные трубопроводы, обечайки, остаточные сварочные деформации, стрела прогиба, расчет формоизменения

Обечайки турбинных трубопроводов (водоводов) являются составными элементами водопропускного тракта ГЭС и изготавливаются непосредственно на промышленных полигонах строящихся объектов. Схема обечайек и их геометрические характеристики приведены на рис. 1 и в таблице. При этом один из наиболее распространенных технологических вариантов их изготовления предусматривает сборку обечайек из отдельных элементов (секторов) в вертикальном положении и последующую электрошлаковую сварку пазовых стыков.

Известно [1, 2], что применение сварки для изготовления подобных конструкций приводит к их формоизменению вследствие наличия остаточных сварочных деформаций. Имеющиеся расчетные схемы прогнозирования деформаций относятся в основном к судовым конструкциям. Кроме того, они получены для ручной дуговой и автоматической сварки под флюсом, мощность тепловложения которых значительно меньше по сравнению с электрошлаковой. Применительно к обечайкам турбинных трубопроводов, выполняемых с применением электрошлаковой сварки, эти сведения носят экспериментальный характер.

Целью настоящей работы являлось получение расчетных зависимостей формоизменения обечайек от их геометрических размеров (длины, диаметра, толщины), а также технологических факторов при их изготовлении.

Замеры деформаций проводили на натурных обечайках. При этом режимы электрошлаковой сварки пазовых стыков соответствовали штатной технологии. Кроме того, последняя предусматривала сведение к минимуму влияния поперечных деформаций, возникающих в стыке при сварке, в результате установления жесткостей в виде скоб по всей длине стыка, поэтому основное формо-

изменение происходило за счет наличия продольного поля напряжений и проявлялось в выходе пазового стыка из плоскости.

Замеры стрелки прогиба проводили до и после сварки с помощью металлической линейки и струны непосредственно в районе стыка, а также на определенном расстоянии от него по заранее нанесенной сетке. Разницу между этими замерами принимали за фактическую величину прогиба. При этом фиксировали режим сварки, а также величину зазоров в стыке до и после сварки. Результаты проведенных замеров после обработки представлены в виде схемы развертки оболочки

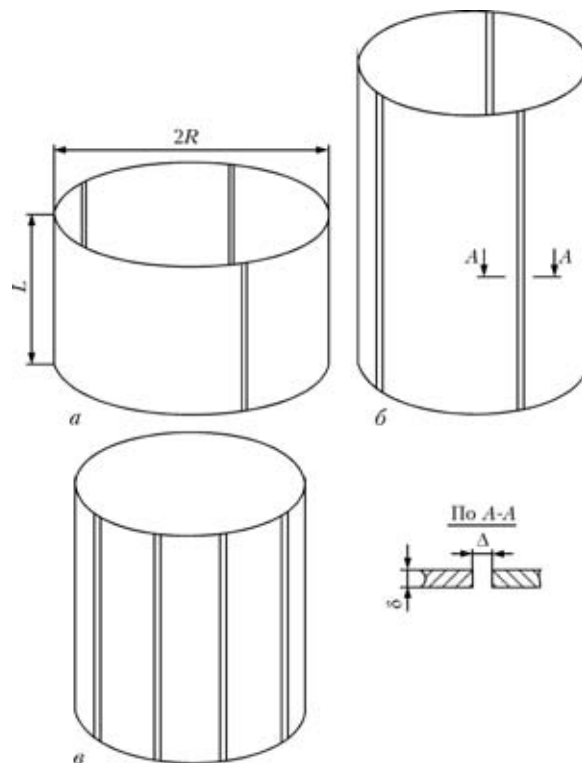


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальных турбинных водоводов ГЭС: *a* — обечайки с переменными  $L/R$  и толщиной  $\delta$ ; *b* — звено с продольными секторами «скорлупами»  $L/R = 2$ ,  $\delta = 25$  мм; *c* — звено с продольными секторами  $L/R = 1$ ,  $\delta = 25$  мм



Геометрические характеристики обечайек и средние прогибы

№ п/п	Размеры обечайки $(D - L) \times \delta$ , мм	Средняя величина прогиба $f$ , мм	Среднее квадратическое отклонение $S$ , мм	Диапазон прогиба в 95%-м доверительном интервале $f \pm 2S$ , мм
1	$(6000 - 1450) \times 25$	7,6	1,9	4...12
2	$(6000 - 3000) \times 25$	10,2	3,2	4...12
3	$(6000 - 3000) \times 25$	9,4	3,3	3...16
4	$(6000 - 6000) \times 25$	19,3	—	—
5	$(6000 - 2000) \times 22$	7,7	2,1	4...12
6	$(6000 - 1680) \times 36$	8,5	1,6	5...12
7	$(6000 - 2300) \times 32$	7,8	1,0	6...10

Примечания. 1. В № 3 применяли сварку с порошковым присадочным материалом.  
2.  $D$  — диаметр;  $L$  — длина;  $\delta$  — толщина обечайки.

(рис. 2). По аналогичной схеме обработаны результаты замеров прогибов 20 обечайек различных геометрических размеров. Полученные данные максимальных прогибов подвергали статистической обработке [3].

Данные расчета доверительных интервалов показывают, что стрелки максимального прогиба изменяются в довольно широких пределах со средним коэффициентом вариации 15...30 %. В таком широком интервале изменений прогибов сравнение по критериям равенства дисперсий и средних значений показывает незначимость влияния геометрических размеров обечайек на величину прогибов. Это объясняется тем, что при сварке рассматриваемых оболочечных конструкций в монтажных условиях существенное влияние на величину прогибов оказывают основные параметры процесса сварки, влияющие на уровень деформации, в частности, величина погонной энергии. Последняя зависит от тепловложения при сварке, что, в свою очередь, определяется режимом сварки (ток, напряжение, скорость сварки и

т. д.). Изменение скорости сварки в рассматриваемых диапазонах (2,5...4 м/ч) уменьшает прогиб в 2...3 раза. В то же время в ходе проведения работы выяснено, что зазоры в продольных стыках изменяются в значительных пределах (20...32 мм), что превышает нормативные требования технологии электрошлаковой сварки ( $24 \pm 2$  мм). При этом значение погонной энергии в зависимости от зазора в указанных пределах для толщины свариваемого металла 25 мм в среднем изменяется в 1,5...2

раза, аналогичная ситуация наблюдается и на других толщинах.

Для повышения чистоты опытов в ходе экспериментов были собраны несколько обечайек со стыками с одинаковыми зазорами (26 мм) и заварены на одинаковом режиме. В этом случае прогиб изменялся в пределах 1 мм и коэффициент вариации составлял 6...7 %, что в 2...4 раза ниже общего уровня коэффициента вариации, отмеченного выше.

Таким образом, незначимость геометрических размеров обечайек на величину прогибов, отмеченная выше, является следствием изменения погонной энергии сварки, которая, в свою очередь, зависит от величины зазоров в стыке, толщины свариваемого металла и мощности тепловложения. В то же время выполнение нормативных требований по подготовке стыков под сварку приводит к стабильности погонной энергии сварки по всей длине, что обуславливает существенное снижение коэффициента вариации остаточных прогибов. В ситуации постоянства погонных энергий величина остаточных прогибов, а следовательно, формоизменение всей оболочки будет определяться ее геометрическими размерами.

Необходимо также отметить, что указанное формоизменение оболочки имеет сложный характер. В плоскости максимальных прогибов она представляет собой криволинейный контур с внутренней вогнутостью в области стыка, по мере удаления от которого знак остаточных деформаций меняется на обратный (выпуклость наружу) с последующим уменьшением деформаций до нуля (рис. 3). При этом величина  $B$ , которая определяет зону сопротивления оболочки ее формоизменению и где величина прогиба изменяется от максимальной (в зоне стыка) до нуля, как показали экспериментальные данные, при максимальном прогибе минимальна, и наоборот (рис. 4).

Если длина обечайки  $L$  меньше ее диаметра  $2R$ , то продольное укорочение пазового сварного

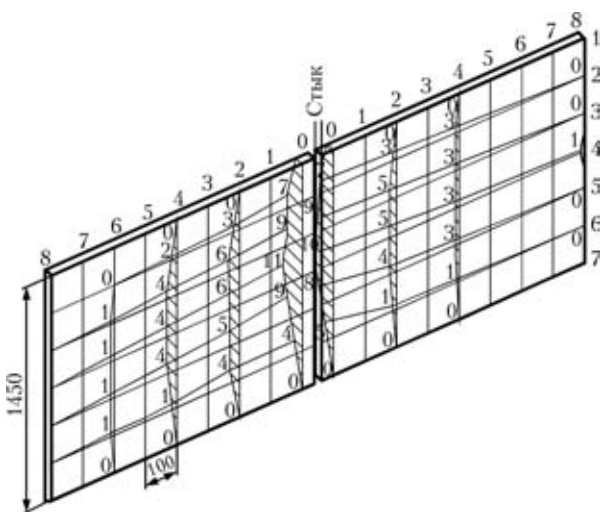


Рис. 2. Схема распределения прогибов на обечайке при электрошлаковой сварке продольного стыка ( $D = 6000$  мм,  $\delta = 25$  мм)

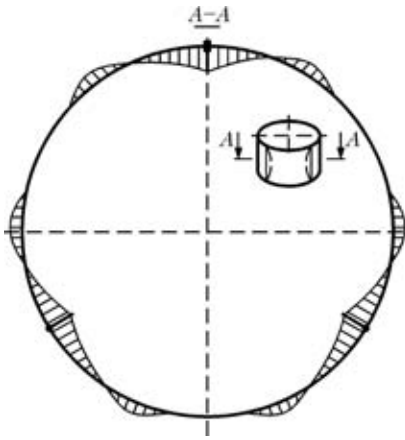


Рис. 3. Характер формоизменения обечайки в плоскости максимальных прогибов продольных швов обечайки звеньев трубопровода

соединения не будет восприниматься всем сечением обечайки, а только его участками, лежащими справа и слева от сварного соединения общей шириной  $B$  (рис. 5). В этом случае местные деформации укорочения и изгиба определяются по формуле

$$f = \frac{\varphi L}{8} = \frac{VL^2 z}{8J}, \quad (1)$$

где  $J$  — момент инерции части кольцевого сечения обечайки шириной  $B$ , сопротивляющейся изгибу от продольного укорочения сварного соединения,  $\text{см}^4$ ;  $z$  — расстояние центра тяжести объема до пересечения центральной оси с внутренней стенкой части обечайки шириной  $b$ ,  $\text{см}$ ;  $f$  — стрелка прогиба паза в плоскости, проходящей через линию паза и ось цилиндра,  $\text{см}$ ;  $V$  — погонный объем продольного укорочения,  $\text{см}^3$ . Для конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей

$$V \cong 3,6 \cdot 10^6 q_{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $q_{\text{п}}$  — погонная энергия одного прохода,  $\text{кал/см}$ .

Используя соотношение

$$\frac{z}{J} = \frac{30}{\delta R^2 \alpha^3} \quad (3)$$

и данные экспериментальных исследований, автор работы [1] для коротких обечайки ( $L < 2R$ ) установил следующую зависимость прогиба пазовых стыков:

$$f = \frac{15}{4} \frac{VR}{K^3 \delta L} \cong 14 \frac{VR}{\delta L}, \quad (4)$$

которая существует при условии  $\alpha = K \frac{L}{R}$ , где  $K \cong 0,65$ .

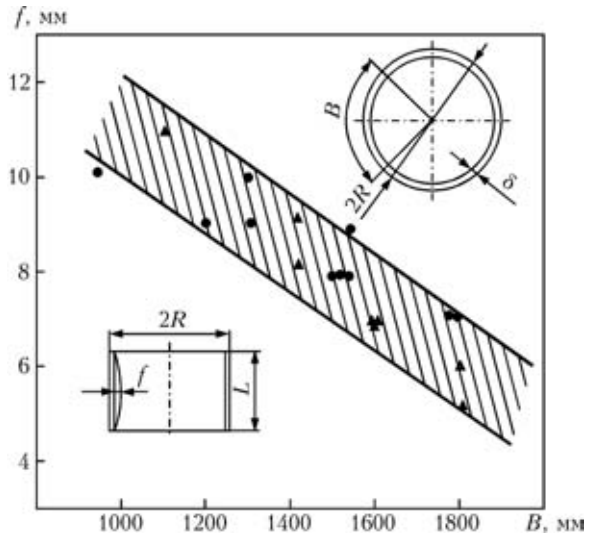


Рис. 4. Зависимость стрелки прогиба  $f$  от параметра  $B$  на стыках обечайки, сваренных электрошлаковым способом (● — толщина металла 36, ▲ — 25 мм)

Проверка применимости формулы (4) для расчета прогибов пазовых швов оболочек, рассматриваемых в настоящей работе, показала, что расчетные данные не соответствуют экспериментальным, более того, изменения расчетного прогиба и экспериментального по характеру противоположны. Анализ формулы (4) показывает, что с уменьшением отношения  $L/R$  прогиб возрастает и стремится к бесконечности. Очевидно, указанная зависимость получена на основании замеров оболочек в узкой области изменения их геометрических параметров и режимов сварки, что подробнее будет рассмотрено ниже.

Для дальнейшего рассмотрения объединим формулы (1)–(3) и сделаем некоторые перестановки их членов:

$$f = 13,5 \cdot 10^{-6} \frac{q_{\text{п}} L^2}{\delta R^2 \alpha^3}. \quad (5)$$

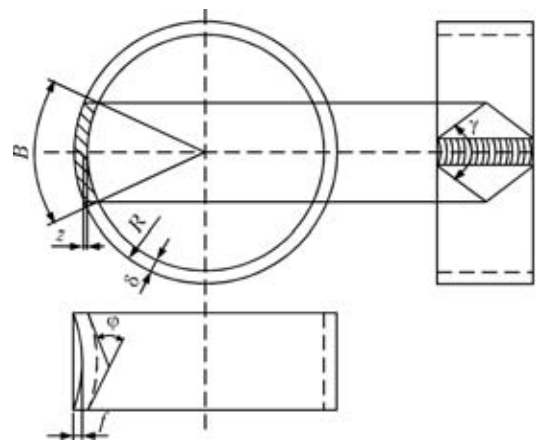


Рис. 5. Схема ширины оболочки  $B$  обечайки, сопротивляющейся изгибу от продольного укорочения пазового соединения (остальные обозначения см. в тексте)



Однако при расчете прогиба  $f$  по формуле (5) необходимо знать изменение угла  $\alpha$  от геометрических параметров обечайки, в частности, длины  $L$  и радиуса  $R$ . Зависимость угла  $\alpha$  от указанных параметров следует из априорного утверждения, что чем длиннее обечайка, тем большая часть ее поперечного сечения вовлекается в сопротивление продольному укорочению сварного соединения [1]. Решая обратную задачу путем подстановки средних экспериментальных значений прогиба  $f$  и известных величин соотношения  $L/R$ , а также средних значений используемых погонных энергий сварки, можно определить зависимость реального угла  $\alpha$  от  $L/R$ , которая приведена на рис. 6, из которого видно, что с возрастанием  $L/R$  тенденция к увеличению угла  $\alpha$  сохраняется. Однако в нашем случае характер изменения величины  $\alpha$  отличается от прямолинейного. Кривая зависимости  $\alpha$  от  $L/R$  аппроксимирована выражением

$$\alpha = 0,65 \left( \frac{L}{R} \right)^{0,63} \quad (6)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (5), после преобразования получаем эмпирическую зависимость

$$f = 49,2 \cdot 10^{-6} \frac{q_{\text{п}}}{\delta} \left( \frac{L}{R} \right)^{0,11} \quad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что влияние на прогиб геометрических параметров  $R$  и  $L$  незначительно, но в большей степени прогиб определяется удельным тепловложением  $q_{\text{п}}/\delta$ . На основании выражения (7) построена расчетная номограмма для определения стрелки максимального прогиба  $f$  в зависимости от погонной энергии  $q_{\text{п}}$ , толщины металла  $\delta$  и соотношения  $L/R$  (рис. 7). По известным толщине металла обечайки и соотношению  $L/R$ , конкретной погонной энергии опре-

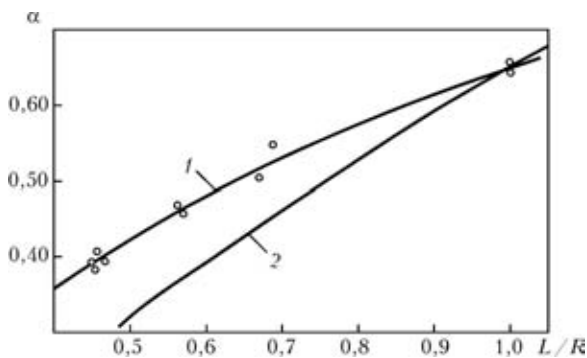


Рис. 6. Расчетная зависимость угла  $\alpha$  от соотношения геометрических размеров обечайки  $L/R$ : 1 — расчетные данные настоящей работы ( $\alpha = 0,65(L/R)^{0,63}$ ); 2 — расчетные данные работы [1] ( $\alpha = 0,65(L/R)$ ); точки — эксперимент

деляется удельная погонная энергия  $q_{\text{п}}/\delta$ , затем по соотношению  $L/R$  — максимальный прогиб  $f$ . На графике зависимости  $q_{\text{п}}/\delta = f(q_{\text{п}}, \delta)$  выделена заштрихованная область, определяющая погонные энергии наиболее часто используемых режимов электрошлаковой сварки (при скорости подачи электрода  $v_s = 360 \dots 430$  м/ч, диаметре электрода 3 мм, сварочном токе  $I_{\text{св}} = 650 \dots 750$  А, зазоре между свариваемыми кромокками  $\Delta = 24$  мм). Если величина зазора отличается от указанного, значение  $q_{\text{п}}$  или  $q_{\text{п}}/\delta$  должно быть умножено на поправочный коэффициент  $K_{\Delta}$  (зависимость  $K_{\Delta}$  от зазора показана на номограмме).

Как видно из номограммы, практически для всех рассматриваемых толщин металла оболочек с различными соотношениями  $L/R$  в используемом диапазоне режимов сварки прогибы изменяются в небольшом диапазоне. Однако изменение зазора в стыке и, как следствие, погонной энергии сварки (за пределы регламентируемых) вызовет значительное возрастание прогиба.

Из расчетной формулы и анализа номограммы следует, что уменьшать прогиб продольных стыков обечаек, свариваемых электрошлаковой сваркой, наиболее рационально путем снижения погонной энергии. Поскольку в ходе настоящих экспериментов использовались минимально возможные погонные энергии для сварки проволокой диаметром 3 мм, то снижение уровня деформации на данных оболочках при традиционной технологии сварки практически невозможно. Однако его можно значительно снизить при применении сварки проволокой большого диаметра 4...5 мм, уменьшении зазора, применении порошкового присадочного металла, дополнительного стока тепла (спреера) и т. д.

Необходимо отметить, что зависимость (7) может быть использована с определенной корректировкой и при расчете деформаций тонких оболочек, свариваемых другими способами сварки, что подтверждается сравнением данных расчета для оболочек, представленных в работе [1].

Из рис. 8 видно, что расчетные значения прогибов, определенные по формулам (4) и (7), весьма близки к пределу поля разбросов экспериментальных значений для исследованных автором работы [1] геометрических размеров обечаек.

В заключение следует отметить, что изготовление обечаек турбинных водоводов ГЭС по штатной технологии (с использованием электрошлаковой сварки) приводит к существенным формоизменениям этих конструкций, вызванных сварочными деформациями. Максимальная стрелка прогиба пазового стыка за счет выхода его из плоскости для исследованного диапазона обечаек составляет 3...19 мм, а контур обечайки в плоскости максимальных прогибов представляет собой кри-

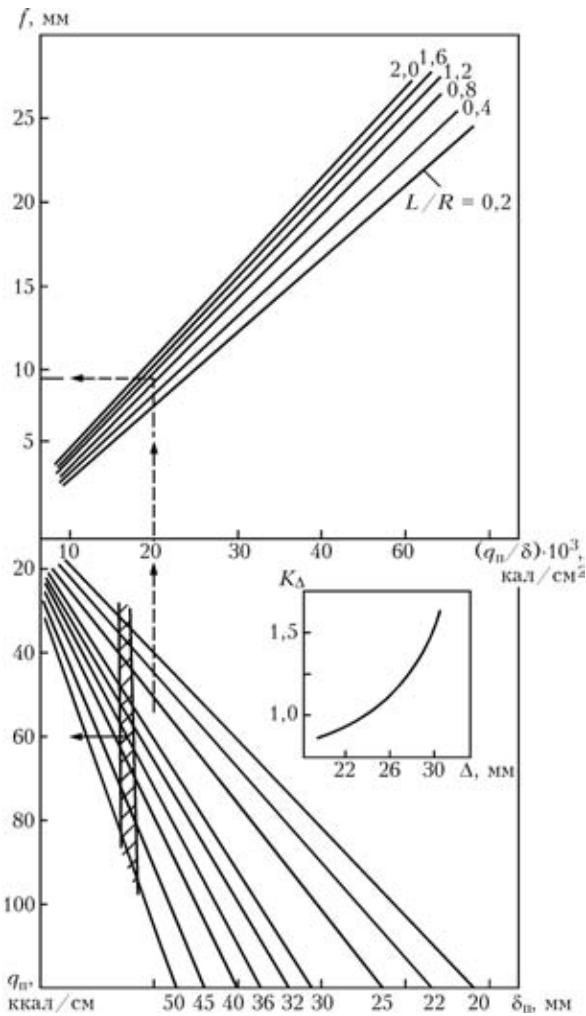


Рис. 7. Номограмма для определения максимальной стрелки прогиба  $f$  при электрошлаковой сварке продольного стыка обечайки звена трубопровода

волинейную замкнутую линию с вогнутостью в районе шва и выпуклостью на некотором расстоянии от него с последующим выходом на правильную окружность.

Статистический анализ полученных данных показал незначимость влияния геометрических размеров свариваемых обечаек на максимальные прогибы, что объясняется большим разбросом полученных экспериментальных данных (коэффициент вариации 15...30%). Последний вызван значительными отклонениями зазоров в стыках от

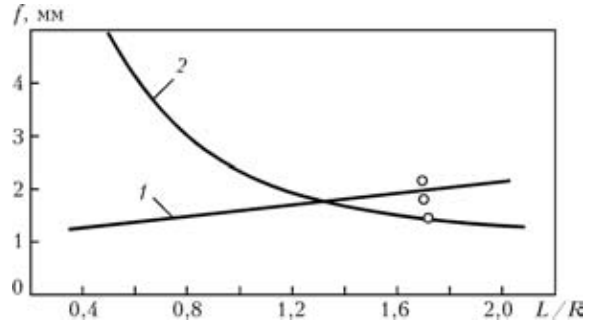


Рис. 8. Расчетные значения максимальных прогибов  $f$  продольных швов обечаек толщиной 12 мм, выполненных с использованием сварки: 1 — по формуле (4); 2 — по (7); точки — эксперимент

нормативных и, как следствие, большими колебаниями погонных энергий сварки.

При выполнении нормативных требований по подготовке стыков под сварку изменение геометрических размеров и погонных энергий сварки оказывает значимое влияние на прогиб пазовых стыков, при этом разброс экспериментальных данных характеризуется коэффициентом вариации 6...7%.

Полученная эмпирическая зависимость остаточных максимальных прогибов пазовых стыков с учетом влияния погонной энергии сварки и жесткости свариваемой обечайки позволяет прогнозировать ее формоизменение.

Проведен расчетный анализ влияния погонной энергии сварки, а также геометрических размеров обечаек на максимальный прогиб пазовых стыков. Построена номограмма, позволяющая определить максимальный прогиб в зависимости от изменения указанных выше факторов.

Расчетным путем установлено, что для обечаек, применяемых в гидротехнике, основным фактором, определяющим их формоизменение, является погонная энергия сварки.

1. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974.
2. Панин В. Н. и др. Оценка остаточных сварочных деформаций обечаек турбинных водоводов ГЭС // Сварочные работы в энергетическом строительстве. — 1982. — Вып. 7.
3. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973.

Application of electroslag welding in fabrication of shells of turbine penstocks in hydroelectric stations leads to a change of their shape under the action of residual welding deformations. Calculated dependencies of shell shape change are given, allowing for their geometrical dimensions and technological factors in manufacturing.

Поступила в редакцию 18.08.2006