

М.М. ПЕКЛИЧ, гл. конструктор НТК ЧАО „АзовЭлектроСталь”, Мариуполь,
А.Н. ТКАЧУК, аспирант каф. ДПМ НТУ „ХПИ”, Харьков;
М.М. ПЕКЛИЧ, зам. гл. конструктора НТК ЧАО „АзовЭлектроСталь”, Мариуполь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА КОНВЕРТОРА НА МОДЕЛИ ИЗ НИЗКОМОДУЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

У статті описані методика та результати експериментального дослідження напружено-деформованого стану макету конвертора. Макет виготовлено з низькомодульного матеріалу. Визначено вплив конструктивних схем на напружений стан корпусу конвертора.

В статті описані методика і результати експериментального дослідження напружено-деформованого стану макету конвертора. Макет изготовлен из низкомодульного материала. Определено влияние конструктивных схем на напряженное состояние корпуса конвертора.

The article describes the methodology and results of experimental investigation of stress-strain converter model. The model is manufactured from low-modulus material. The influence of constructive scheme on stress-strain state converter frame is determined.

Введение. Большое количество машиностроительных конструкций подвергаются в процессе выполнения штатных технологических операций совместному воздействию тепловых и механических нагрузок. При этом элементы данных конструкций часто находятся в условиях термомеханического контакта друг с другом. Численное моделирование таких процессов и состояний приводит к решению сложных задач анализа их термоупругого состояния (ТУС) с учетом связанного термомеханического контакта. Кроме сложного описания математической модели, дополнительные трудности обусловлены еще и условиями механического контактного взаимодействия, а также условиями распространения тепловых потоков и теплопередачей в местах сопряжения контактирующих тел. В данном случае речь идет о физико-механических характеристиках, фигурирующих в соотношениях, которые описывают термоупругое состояние внутри областей, занимаемых телами, и на их границах. Также не всегда априорно известны сами эти соотношения. Таким образом, необходимо проводить комплекс экспериментальных исследований, результаты которых дают возможность идентифицировать и типы искомым соотношений, и значения входящих в эти соотношения физико-механических характеристик.

Учитывая, что речь идет о многофакторных исследованиях, целесообразно разделить эту задачу на отдельные подзадачи и провести анализ влияния отдельных факторов на состояние машиностроительной конструкции. В частности, выделяются подзадачи анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) при чисто механическом контакте, термоупругое состояние при действии стационарных и нестационарных тепловых потоков, а также нестационарное ТУС с учетом

связанного термомеханического контакта.

В данной работе решается первая из вышеперечисленных задач. В качестве объекта выбран конвертор, представляемый для удобства в виде макета из низкомодульного материала. В процессе исследований определено напряженно-деформированное состояние элементов модели корпуса конвертера и характер распределения напряжений при варьировании их конструктивных параметров.

Цель исследований. Цель данной работы заключалась в установлении эффективности конструктивного исполнения двух вариантов (А и Б) кронштейнов и ребер жесткости в зоне крепления систем подвески корпуса к опорному кольцу конвертера по напряженно-деформированному состоянию. Модель корпуса конвертера была изготовлена из оргстекла с двумя вариантами конструкции кронштейнов и ребер жесткости (рис. 1 и 2). Основное отличие их заключалось в том, что ребра узла А имеют прерывистую зону охвата нижней части корпуса, а ребра узла Б – сплошную.

Основной задачей проведенных исследований являлось определение напряженно-деформированного состояния кронштейнов, ребер жесткости и корпуса конвертера в зоне крепления систем подвески его к опорному кольцу. По результатам исследований даны оценки напряженного состояния конструктивных исполнений обоих узлов, которые в дальнейшем могут быть использованы для отработки математических и численных моделей при анализе НДС корпусов конверторов с учетом контактного взаимодействия.

Объект исследований. Исследованиям подвергалась модель корпуса конвертера, изготовленная из оргстекла в масштабе 1:25 (см. рис. 1 и 2). При изготовлении модели было использовано органическое стекло марки СО-95 ГОСТ 10667-74, имеющее следующие физико-механические свойства: предел прочности: $\sigma_b = 65$ МПа, предел текучести: $\sigma_T = 30$ МПа; модуль упругости $E = 3,0 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$. Модель корпуса конвертера изготовлена по методу геометрического подобия [1-5]. Модуль геометрического подобия модели определялся формулой [5]:

$$\alpha = l_n / l_m = 25. \quad (1)$$

Здесь l_n, l_m – габаритные размеры конвертера и модели соответственно.

Модуль геометрического подобия выбран с учетом сложности изготовления исследуемых элементов, условий поставленной задачи и наличия материала.

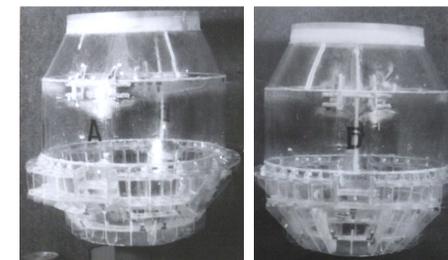


Рис. 1. Общий вид модели корпуса конвертера, кронштейнов и ребер жесткости в зоне крепления систем подвески корпуса к опорному кольцу (вариант А)

Рис. 2. Общий вид модели корпуса конвертера, кронштейнов и ребер жесткости в зоне крепления систем подвески корпуса к опорному кольцу (вариант Б)

Модуль силового подобия модели

$$\beta = P_n / P_m, \quad (2)$$

где P_n – величина суммарной нагрузки (Н), приходящаяся на корпус конвертера от веса футеровки и садки, а P_m – величина испытательной нагрузки (Н), выбран из условия создания в элементах модели определенного уровня НДС [1-5], соответствующего требованиям подобия – создание в модели деформаций, достаточных для измерений и находящихся в пределах упругих деформаций [1]

$$\beta = C_E \cdot \alpha^2. \quad (3)$$

Здесь $C_E = E_{\text{стали}} / E_{\text{оргстекла}}$ – модуль подобия упругости, а α – модуль геометрического подобия. Отсюда $C_E = 70$, а $\beta = 43750$.

При исследовании модели использовалось две схемы нагружения: четырехточечное опирание модели на опоры 1,2,3,4 и двухточечное опирание модели – опоры 1-3 и 2-4. Вес испытательной нагрузки составил: для четырехточечного опирания модели $P_{M_4} = P_n / \beta = 430$ Н, а для двухточечного опирания модели: $P_{M_2} = P_n / 2\beta = 215$ Н.

Величины испытательных нагрузок модели P_{M_4} и P_{M_2} , полученные расчетным путем, не создают в модели достаточных для измерения деформаций, поэтому их величины были скорректированы экспериментальным путем. В этом случае испытательные нагрузки составили: $P_{M_4} = 1$ кН; $P_{M_2} = 600$ Н.

Методика исследований. Исследование модели корпуса конвертера проводилось в два этапа. Исследования по первому этапу предусматривали определение общего уровня напряженного состояния исследуемых узлов.

При этом было установлено 185 тензорезисторов. После предварительных обработки и анализа полученных результатов первого этапа были определены наиболее напряженные элементы и зоны модели, которые были подвержены более детальному исследованию при двухточечном и четырехточечном опирании. На втором этапе количество точек регистрации деформаций при этом составило 87 шт.

Нагружение модели осуществлялось мерными грузами через песчаную подушку. Контроль равномерности распределения по днищу модели испытательной нагрузки производился по величине сжатия пружин на опорах, для чего пружины были предварительно оттарированы и подобраны по жесткости. Измерение деформации производилось методом электротензометрии с использованием тензорезисторов типа КФ-5 сопротивлением $R = 100$ Ом и базой 5 мм. Схемы установки тензорезисторов представлены на рис. 3-22. Показания тензорезисторов фиксировались тензометрической измерительной системой СИИТ-3 (рис. 23). При проведении исследований модели с группой рабочих тензорезисторов включался один и тот же компенсационный.

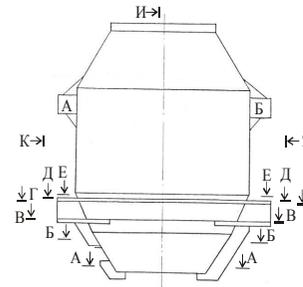


Рис. 3. Исследуемые сечения модели корпуса конвертера

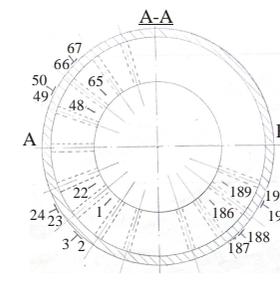


Рис. 4. Схема установки тензорезисторов в сечении А-А

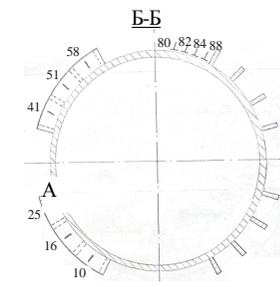


Рис. 5. Схема установки тензорезисторов в сечении Б-Б

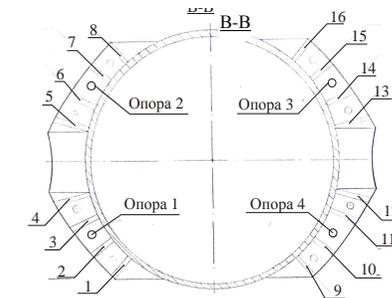


Рис. 6. Нумерация исследуемых ребер, установленных на модели корпуса конвертера

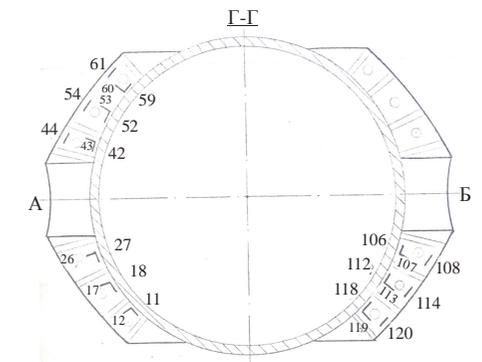


Рис. 7. Схема установки тензорезисторов в сечении Г-Г (нижний пояс)

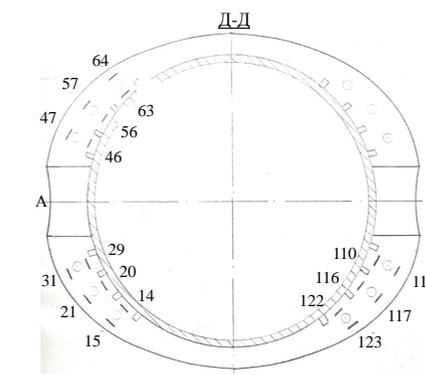


Рис. 8. Схема расположения тензорезисторов на верхнем поясе

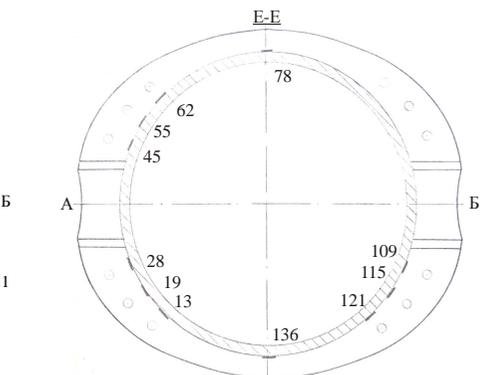


Рис. 9. Схема расположения тензорезисторов в сечении Е-Е

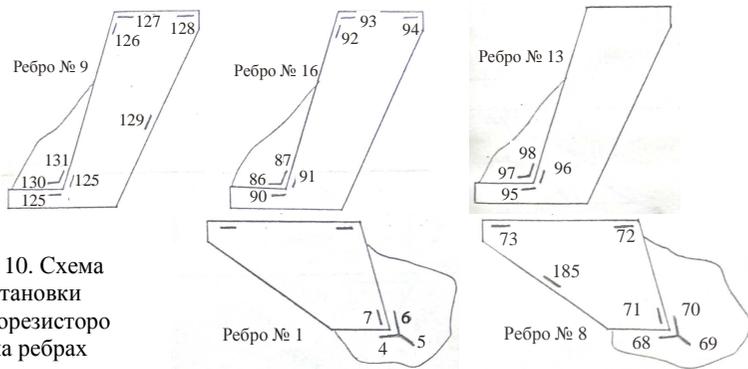


Рис. 10. Схема установки терморезисторов в на ребрах

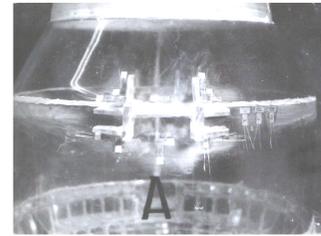


Рис. 13. Установка тензорезисторов в зоне кронштейнов

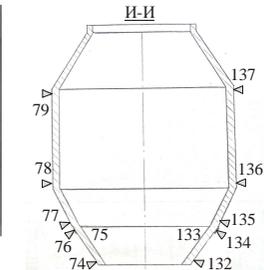


Рис. 14. Схема установки тензорезисторов в сечении И-И

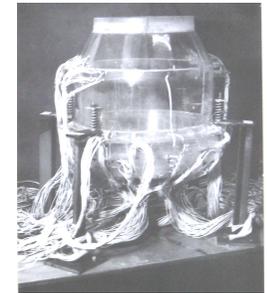


Рис. 15. Опирание модели корпуса на четыре опоры

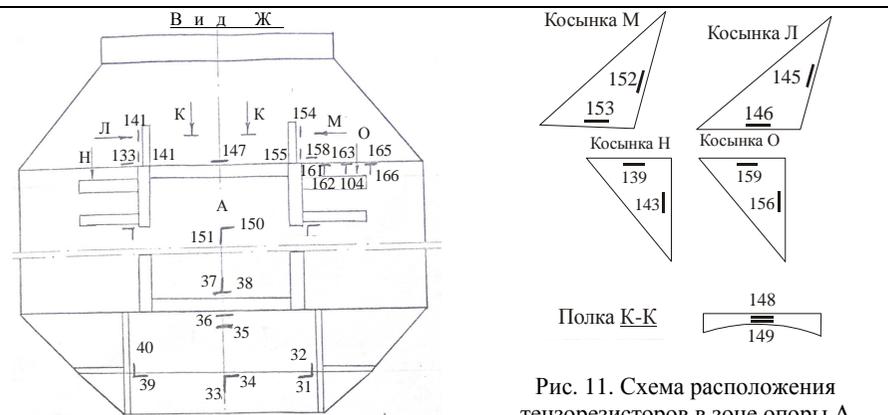


Рис. 11. Схема расположения тензорезисторов в зоне опоры А

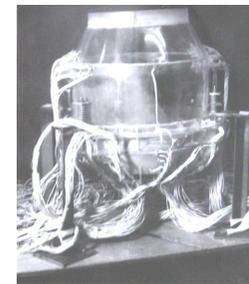


Рис. 16. Установка пружин для контроля равномерности распределения нагрузки



Рис. 17. Опирание модели корпуса конвертера на две диаметрально расположенные опоры

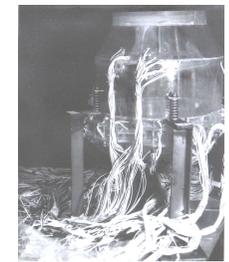


Рис. 18. Установка модели конвертера в испытательном стенде при опирании на четыре опоры

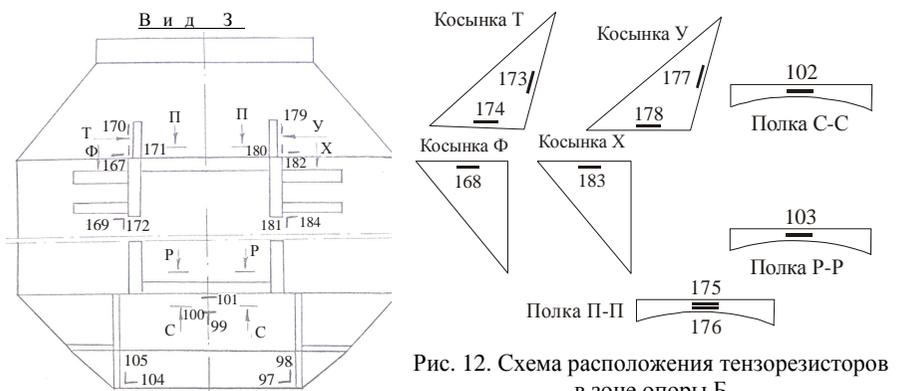


Рис. 12. Схема расположения тензорезисторов в зоне опоры Б

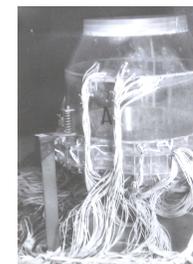


Рис. 19. Установка модели конвертера в испытательном стенде при опирании на две диаметрально расположенные опоры

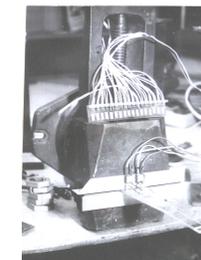


Рис. 20. Тарировочное устройство



Рис. 21. Установка тензорезисторов в зоне крепления подвески корпуса к опорному кольцу (вариант А)

Перед началом проведения исследований тензометрическая измерительная система подвергалась тарировке, в результате которой был определен тарировочный коэффициент (см. рис. 20, 23). Регистрация деформаций про-

изводилась по истечении 15-20 мин. после нагружения модели, с целью получения стабильных значений деформации при нагружении испытательной нагрузкой. Величины напряжений в исследуемых элементах определялись произведением разности абсолютных значений двух показаний прибора (нагруженного и ненагруженного состояний) на цену деления прибора $\sigma = K(N_n - N_0)$, где N_0 , N_n – показание прибора при ненагруженном и нагруженном состояниях модели соответственно; K – цена деления прибора, Н/ед.дел.

Результаты испытаний. Величины максимальных напряжений, полученные при испытаниях модели и в пересчете на натурный образец, приведены в табл. 1-5. Для оценки напряженного состояния кронштейнов и ребер жесткости корпуса конвертера напряжения, полученные на модели, были пересчитаны на натуру по формуле [5]:

$$\sigma_n = (\sigma_m \cdot \beta) / \alpha^2, \quad (4)$$

где σ_n , σ_m – напряжение на натурном образце и на модели соответственно.

В связи с тем, что испытательная нагрузка модели P_{m4} превысила расчетную в 2,3 раза при четырехточечном опирании и в 2,8 раза – при двухточечном, при определении напряжений в натуре в формулу (4) вводились эти величины, и она приняла следующий вид:

$$\text{- для четырехточечного опирания -} \quad \sigma_n = 30,4\sigma_m; \quad (5)$$

$$\text{- для двухточечного опирания -} \quad \sigma_n = 25\sigma_m. \quad (6)$$

Таблица 1

Максимальные значения напряжений (МПа), полученные при испытании модели конвертера (I этап)

№№ точек										
26	41	44	52	53	61	113	114	120	141	167
4-х точечное опирание модели при нагрузке P = 1 кН										
-2,9	-2,6	-2,5	-3,6	-1,88	-2,4	-1,38	-7,65	-2,06	-2,08	-2,57
В натурном образце при нагрузке P = 1900 т										
-88,2	-79,4	-76,0	108,9	-57,2	-73,0	-42,0	238,6	-6,2	-63,3	78,2



Рис. 22. Установка тезорезисторов в зоне крепления подвески корпуса к опорному кольцу (вариант Б)



Рис. 23. Измерительная аппаратура

Анализ результатов исследования. Несмотря на различное конструктивное исполнение узлов крепления, уровень напряженного состояния в исследуемых моделях примерно одинаков. Напряжения в точках 52, 54, 114 имеют максимальные значения и не являются оценочными для зон, в которых они установлены, т. к. они возникли от приложения сосредоточенной нагрузки, которая отсутствует на натурном образце. Численные значения напряжений в обоих узлах не превышают 38 МПа. Напряжения, полученные выше, не учитывают деформаций от собственного веса корпуса конвертера.

Таблица 2

Максимальные значения напряжений (МПа), полученные при испытании модели конвертера (двухточечное опирание модели, опоры 2 в 4, I этап)

№№ точек	44	53	54	61	83	114	120
При нагрузке P = 600 Н	-2,64	-2,04	14,2	-3,07	-2,1	10,4	-1,88
В натурном образце при нагрузке P = 950 т	-66	-51	356	-76,8	-52,8	260	-47

Таблица 3

Максимальные значения напряжений (МПа), полученные при испытании модели конвертера (двухточечное опирание модели, опоры 1 в 3, I этап)

При нагрузке P = 600 Н		В натурном образце при нагрузке P = 950 т	
Точка № 18	-1,8	Точка № 18	-45,0

Таблица 4

Максимальные значения напряжений (МПа), полученные при испытании модели конвертера (четырёхточечное опирание модели, II этап)

№№ точек	44	53	54	104	113	114
При нагрузке P = 1 кН	-1,93	-1,52	7,08	1,53	-1,35	5,06
В натурном образце при нагрузке P = 1900т	-58,7	-46,2	215,3	46,6	-41,1	153,9

Таблица 5

Максимальные значения напряжений (МПа), полученные при испытании модели конвертера (двухточечное опирание, опоры 2 в 4, II этап)

№№ точек	44	53	54	114
при нагрузке P = 600 Н	-2,38	-1,98	7,8	6,63
В натурном образце при нагрузке P = 1900т	-59,5	-49,5	195,0	155,8

Заключение. На основании анализа результатов, полученных при проведении исследований на модели и пересчитанных на натуру, можно сделать следующее заключение: эффективность конструктивного исполнения опорных узлов А и Б в зоне крепления систем подвески корпуса к опорному кольцу по критерию уровня напряженного состояния примерно одинакова.

Полученные экспериментальным путем распределения напряжений в корпусе конвертера будут в дальнейших исследованиях использованы в ходе отработки математической и численной моделей напряженно-деформированного состояния корпуса конвертера, а также для верификации результатов численных исследований.

Список литературы: **1.** *Перлин А.А.* Исследование прочности судовых конструкций на тензометрических моделях // А.А. Перлин, М.К. Шалкин, Ю.К. Хрящев. – Ленинград: Судостроение, 1967. – 80 с. **2.** *Гудимов М.М.* Органическое отекло // М.М. Гудимов, Б.В. Перов. – М: Химия, 1981. – С. 164-169. **3.** *Поляков Л.П.* Моделирование строительных конструкций // Л.П. Поляков, В.М. Файнбурд. – Киев: Будівельник, 1975. – 159 с. **4.** *Пригоровский Н.И.* Исследование напряжений и жесткости деталей машин на тензометрических моделях / Н.И. Пригоровский, А.К. Прейсс. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 272 с. **5.** *Пригоровский Н.И.* Методы и средства определения полей деформаций и напряжений / Н.И. Пригоровский. – М.: Машиностроение, 1982. – 248с.

Поступила в редколлегию 12.05.2011