

УДК 624.014:624.074.7:624.953

**КОНСЕРВАЦИЯ УСТАЛОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ СТЕНОК  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫМИ ФИБРО-  
ПЛАСТИКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

**Дзюба С.В.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

**STRENGTHENING OF FATIGUE SENSITIVE ELEMENTS  
OF METALLIC CYLINDRICAL RESERVOIR'S WALLS BY  
PRESTRESSED FIBER REINFORCED POLYMERS**

**Dzyuba S.V.** (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa)

**Рассматриваются причины, достигаемый эффект и возможный метод расчета усиления усталостных дефектов стенок металлических цилиндрических резервуаров с использованием предварительно напряженных фибропластиковых элементов**

**Ключевые слова: металлические цилиндрические резервуары, методы усиления усталостных дефектов элементов стенок резервуаров, фибропластиковые системы**

**The reasons, the effects and the possible estimating method of the fatigue strengthening of metallic cylindrical reservoir's walls by prestressed fiber reinforced polymers are examined**

**Keywords: metallic cylindrical reservoirs, the strengthening methods of the fatigue sensitive elements of reservoir's walls, fiber reinforced polymer (FRP) systems**

**Причины, определяющие необходимость усиления.** Сложившийся отечественный парк металлических цилиндрических резервуаров характеризуется сравнительно длительными сроками эксплуатации: по состоянию на начало 2000-х годов около 75% таких сооружений находились в работе более 20 лет, а 40% — более 30 лет [1]. Длительная эксплуатация резервуаров обуславливает существенный физический износ их конструкций и сопутствующую аварийность. К числу наиболее опасных дефектов стенок металлических резервуаров, развивающихся в процессе эксплуатации, относят усталостные трещины вертикальных стыковых соединений листовых элементов, являющиеся следствием геометрических несовершенств сборки конструкций, со-

провожаемых появлением значительных по величине местных напряжений [2, 3]. Уже после 15...20 лет эксплуатации, т.е.  $5 \times 10^3 \dots 10^4$  рабочих циклов, во многих вертикальных стыках стенок резервуаров, изготовленных из рулонированных заготовок с толщиной листов 16 мм и более, зарождаются усталостные трещины [4], что при практически монополюсном положении рулонного способа изготовления отечественных резервуаров стало причиной аварийного состояния большого количества сооружений, работающих в режиме интенсивного малоциклового (1...2 цикла налива-слива в сутки) нагружения [5]. Возможные аварии, связанные с разрушением вертикальных стыков полотнищ стенки резервуаров, особенно опасны, поскольку потенциально ведут к лавинообразному разрушению сооружений [1].

Традиционные методом борьбы с подобными усталостными дефектами предусматривают устройство внешних горизонтальных усиливающих ребер [6], ограничивают возможное количество циклов эксплуатации сооружений [7-9] или предполагают радикальный уход от совмещенного стыка стенки путем сварки по всей высоте сооружения специальных «гребенчатых» вставок [3, 4, 10]. Современной альтернативой данным решениям, сопряженным с рядом конструктивно-технологических сложностей, является начальная консервация развития усталостных дефектов стенок резервуаров внешними слоями предварительно напряженных фибропластиковых элементов конечной или, при сплошном усилении поясов конструкций, непрерывной длины.

**Консервация дефектов фибропластиковыми элементами.** Применение предварительно напряженных фибропластиковых элементов, устанавливаемых на усталостные дефекты элементов листовых конструкций, позволяет понизить амплитуду действующих растягивающих напряжений  $\Delta\sigma$  (см. рис. 1) и уменьшить степень концентрации напряжений в зоне расположения дефектов, путем частичной передачи усилий внешним слоям комплексной конструкции. Кроме того важным фактором является то, что создающие усилия сжатия металлических элементов  $\sigma_{sp}$  предварительные напряжения фибропластиков  $\sigma_{fp}$  в значительной степени снижают коэффициент асимметрии напряжений во времени

$$R = \frac{\sigma_{min} - \sigma_{sp}}{\sigma_{max} - \sigma_{sp}}, \quad (1)$$

замедляя и, в конечном итоге, останавливая развитие соответствующих дефектов.

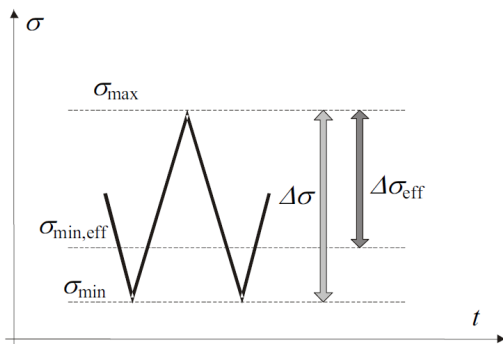


Рис. 1. Изменение напряжений во времени:  $\sigma_{min}$  — минимальные напряжения за расчетный период времени,  $\sigma_{max}$  — максимальные напряжения за расчетный период времени,  $\sigma_{min,eff}$  — минимальная величина эффективных напряжений, определяющих блокирование развития усталостных дефектов [11]

**Возможные методы расчетов.** Теоретические решения, позволяющие осуществлять рассматриваемые усиления, могут быть получены на концептуальной основе теории механики разрушений с учетом результатов исследований [12-19], обобщенных и систематизированных в [11]. Адаптация данного метода применительно к листовым конструкциям стенок цилиндрических резервуаров позволяет получить величину предварительного напряжения фибропластиковых элементов усиления  $\sigma_{fp}$ , обеспечивающего необходимый уровень начальных напряжений стальных элементов  $\sigma_{sp}$ , блокирующий развитие возможных усталостных трещин.

Снижение диапазона действующих в металлических элементах напряжений  $\Delta\sigma$  может быть оценено параметром

$$\rho = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_f A_f}, \quad (2)$$

где:  $E_s A_s$ ,  $E_f A_f$  — продольные жесткости стальной и фибропластиковой частей усиленного сечения стенки резервуара: при непрерывном усилении фибропластиками по высоте нижних поясов конструкции, соответственно равные  $E_s t_s$ ,  $E_f t_f$  ( $t_s$ ,  $t_f$  — толщины стальной и фибропластиковой составляющих сечения).

Приведенное в [11] выражение амплитуды напряжений

$$\Delta\sigma = \frac{\eta(1-R_{th})\sigma_0\alpha}{2R_{th}\gamma_{Rd}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta K_{eff,th}}{\gamma_s} \frac{4R_{th}(1+\alpha)}{\alpha^2\sigma_0\rho\sqrt{\pi a}}} \right), \quad (3)$$

где:  $\sigma_0 = (f_{yd} + f_{td})/2$  — среднее значение напряжений текучести и временной прочности усиливаемой стали,  $\alpha$  — ограничивающий пластическую работу коэффициент, величина которого может быть принята равной  $\sqrt{2\sqrt{2}} = 1,68$ ,  $a$  — длина ветви трещины, условно равная половине ее общей длины (см. рис 2),  $\eta$ ,  $\gamma_{Rd}$ ,  $\gamma_s$  — частные коэффициенты, соответственно определяемые средой и продолжительностью эксплуатации фибропластиковых усиления, характером напряженного состояния и особенностями использованных сталей (см. [11]),

дает возможность получить методом подбора, с использованием широко распространенных расчетных программ (например, *Microsoft Excel*), граничную величину коэффициента асимметрии напряжений  $R_{th}$ .

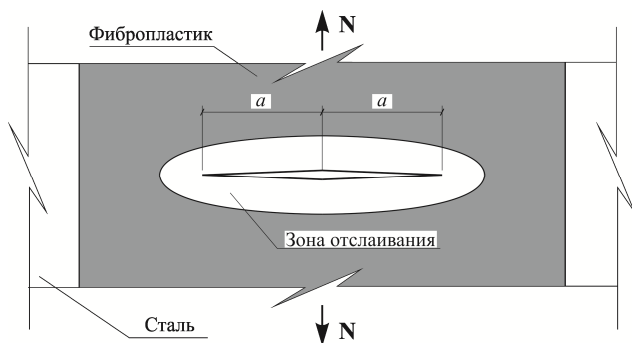


Рис. 2. Зона отслаивания усиливающих фибропластиков по контуру усталостных трещин стальных элементов

Используемая при подборе необходимой величины коэффициента асимметрии напряжений  $R_{th}$  граничная величина параметра амплитуды изменения интенсивности напряжений в усталостном цикле  $\Delta K_{eff,th}$ , определяющая блокирование процесса разрушения, зависит от особенностей примененных в усиливаемой конструкции материалов. Как отмечают авторы метода, современные стали демонстрируют изменчивость граничной величины данной амплитуды от  $90 \text{ Н/мм}^{3/2}$

(для коэффициента асимметрии напряжений  $R = 0,7$ ) до  $190 \text{ Н/мм}^{3/2}$  (для величины  $R < 0,15$ ). Старые стали показывают большие значения допустимой амплитуды: так при коэффициенте асимметрии напряжений  $R = 0,7$  зафиксированные изменения рассматриваемой величины находились в диапазоне  $145 \dots 180 \text{ Н/мм}^{3/2}$ . Учитывая вышесказанное, при практических расчетах рекомендации [11] предлагают использовать значение, соответствующее консервативной оценке и составляющее  $100 \text{ Н/мм}^{3/2}$ .

Необходимая величина напряжений сжатия в металле  $\sigma_{sp}$ , обеспечивающая граничное значение коэффициента асимметрии напряжений  $R_{th}$  и останавливающая дальнейший процесс усталостного разрушения, может быть определена выражением

$$\sigma_{sp} = \frac{\rho}{\gamma_{Rd}(1-R)} (\sigma_{min} - R_{th}\sigma_{max}) , \quad (4)$$

где:  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  — коэффициент асимметрии действующих напряжений.

Величина предварительного напряжения фибропластиков  $\sigma_{fp}$ , обеспечивающая необходимое обжатие усиливаемых элементов листовой конструкции стенки резервуара и определяющая появление напряжений  $\sigma_{sp}$ , в дальнейшем может быть найдена в соответствии с обычными условиями совместности работы слоев цилиндрической оболочки резервуара.

В случае использования предварительно напряженных фибропластиковых элементов конечной длины, устанавливаемых в виде отдельно стоящих накладок, требуется проверка их адгезионных соединений с основным материалом усиливаемой конструкции, исключающая возможное отслаивание под действием заданных усилий.

Места соединений, соответствующие концам фиброармированных пластиков, а также точкам геометрического прерывания адгезионных соединений по сторонам существующих дефектов стальных конструкций (усталостных трещин), являются выраженными концентраторами напряжений, которым также присущ процесс усталостного разрушения. Достаточно точные и опробованные расчетные модели, позволяющие оценивать такое усталостное разрушение адгезионных соединений, в настоящее время отсутствуют. При невозможности получения соответствующих экспериментальных данных, усталостный лимит работоспособности рассматриваемых соединений может быть оценен как отвечающий  $20 \dots 30\%$  статического предела их прочности [11]. В

случае необходимости, проблема недостаточной несущей способности адгезионных соединений по концам фиброармированных элементов усиленной конечной длины может быть решена с помощью соответствующих механических креплений, нашедших достаточно широкое использование в существующих системах предварительного напряжения фибропластиков (например, приведенных в [20-25]). Концентрация же напряжений по сторонам дефектов-трещин не приводит к непосредственному разрушению элементов усиления, но способствует местному их отслаиванию в прилегающей зоне (рис. 2), останавливаясь по мере приближения внешней длины границы участка отслаивания к необходимой ширине сопряжения фибропластиковых элементов, обеспечивающей требуемую передачу усилий в подобных соединениях.

**Вывод.** Адаптация приведенной методики консервации усталостных трещин установкой предварительно напряженных фибропластиковых элементов применительно к стенкам металлических цилиндрических резервуаров позволяет продлевать их работоспособность, но требует дальнейших исследований, обеспечивающих необходимую экспериментальную апробацию теоретических решений и определяющих степень практической рациональности подобных усиленных.

### *Литература*

1. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / А.В. Перельмутер, В.М. Гордеев, Є.В. Горохов та ін.; За ред. д.т.н. Перельмутера А.В. – К.: Сталь, 2002. – 166 с.
2. Почтовик П.Г., Шаршунов Г.К. Повышение надежности резервуаров нефтеперекачивающих станций путем проведения промежуточных обследований // Металлические конструкции. Сб. тр. МИСИ им. Куйбышева. – М.: МИСИ, 1984. – С. 127-132.
3. Барвинко Ю.П., Голинько В.М., Барвинко А.Ю., Перельмутер А.В., Кулеба Г.В. Повышение работоспособности вертикальных монтажных сварных соединений стенки стальных цилиндрических резервуаров, построенных из рулонных заготовок // Автоматическая сварка, 2001, №7(589). – С. 27-32.
4. Барвинко Ю.П., Голинько В.М., Барвинко А.Ю. О работоспособности вертикальных монтажных стыков стенки цилиндрических резервуаров большой емкости, построенных из рулонных заготовок // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 11-12.

5. Билецкий С.М., Голинько В.М., Барвинко Ю.П. Пути повышения эксплуатационной надежности сварных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых из рулонизируемых заготовок // Автоматическая сварка, 1990, №3. – С. 50-52.

6. РД 39-30-1331-85. Инструкция по усилению вертикальных монтажных стыков стенок резервуаров РВС-20000. — Введ. с 01.01.86 по 01.01.91. – М., 1985. – 6 с.

7. О допусках на угловые деформации вертикальных сварных стыков в резервуарах вместимостью 10...50 тыс. м<sup>3</sup> для хранения нефти и нефтепродуктов / Ю.П. Барвинко, С.М. Билецкий, В.М. Голинько, В.В. Якубовский // Автоматическая сварка, 1991, №4. – С. 20-23.

8. О допусках на угловые деформации вертикальных стыков стенок нефтерезервуаров / Б.В. Поповский, Г.А. Ритчик, Ю.П. Барвинко, С.М. Билецкий, В.М. Голинько // Монтажные и специальные работы в строительстве, 1991, №5. – С. 11-12.

9. ВСН 311-89. Монтаж вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов вместимостью от 100 до 50000 м<sup>3</sup>. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1990. – 60 с.

10. Лялин К.В. Некоторые аспекты совершенствования конструкций и технологии сборки и сварки цилиндрических резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве, 1997, №7. – С. 10-13.

11. CNR-DT 202/2005 Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Metallic structures. Preliminary study. ROME – CNR, June, 2007. – 57 p.

12. Albrecht, P. Fatigue Strength of Adhesively Bonded Cover Plates // ASCE Journal of Structural Engineering, 1987, no. 113(6). – P. 1236-1250.

13. Bassetti, A., Nussbaumer, A., Hirt, M. Crack Repair and Fatigue Life Extension of Riveted Bridge Members using Composite Materials // In Proc., Bridge Engineering Conference, ESE-IABSE-FIB, 26-30 March 2000, Sharm El Sheik (Egypt).

14. Bassetti, A. Lamelles Precontraintes en Fibres de Carbone pour le Renforcement de Ponts Rivetes Endammées Endommages par Fatigue. Ph.D. Thesis no. 2440. Swiss Federal Institute of Technology, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2001.

15. Jones, S.C. and Civjan, S.A. Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend to Steel Fatigue Life // ASCE Journal of Composites for Construction, 2003, no. 7(4). – P. 331-338.

16. Malta, F., Karbhari, V.M., Tinazzi, D., Vitaliani, R. Static and fatigue behaviour of steel // CFRP adhesive bonds for the rehabilitation of metallic bridges. In Di Tommaso A, editor. *Mechanics of masonry structures strengthened with FRP — materials modelling, testing, design, control*. Padova (1): Libreria Cortina, 2004. – P. 411-420.
17. Miller, T.C. *The Rehabilitation of Steel Bridge Girders Using Advanced Composite Materials* // M.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE, 2000. – P. 58-79.
18. Nussbaumer, A., Bassetti, A., Colombi, P. Elements en acier sous charges de fatigue renforcés par des lamelles précontraintes en matériau composite. *Construction Metallique*, 2004, no. 3. – P. 3-13.
19. Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch // *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2003, no. 2(129). – P. 186-196.
20. *FRP Design Guide*, S&P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Switzerland, June 2000. – 70 p.
21. M. Ali and R. El-Hacha. Prestressing system for FRP strengthening steel-concrete composite girders // *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland.
22. Review of strengthening techniques using externally bonded fiber reinforced polymer composites. Report 2002-005-C-01. Project Leader Dr. Sujeeva Setunge. – CRC Construction innovation, 2002. – 67 p.
23. Ragab, N., & El-Hacha R. Effectiveness of various repair Systems for flexural strengthening of steel-concrete composite girders // *Proceedings of the 7th International Conference on short and Medium Span Bridges, SMSB-VI*, August 23-25, 2006, Montréal, Quebec, Canada. – P. RR-107.
24. Miller, T., Chajes, M., Mertz, D., and Hastings, J. Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates // *Journal of Bridge Engineering*, Nov./Dec. 2001. – P. 514-522.
25. Sen, R., Liby, L. & Mullin, G. Strengthening Steel Bridge Sections using CFRP Laminates // *Journal of Composites Part B: Engineering*, Vol. 32, No. 4, 2001. – P. 309-322.