

Усачев Владимир Иванович

Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова.

E-mail: v.usa@bk.ru.

195426, г. Санкт-Петербург, пр. Косыгина, д. 17, корп. 1, кв. 266, тел.: (812)4008689.

Кафедра оториноларингологии, с.н.с., профессор, д.м.н.

Usachev Vladimir Ivanovich

Russian Military Medicine Academy.

E-mail: v.usa@bk.ru.

6, Akademika Lebedeva str., St. Petersburg, 195426, Russia, Phone: (812)4008689.

Professor, Doctor Med. Sc.

УДК 53.004

В.А. Жорник, Ю.А. Прокопенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРОВ¹

В работе рассматриваются температурные напряжения, возникающие в двухслойном цилиндре, в котором внутреннее хрупкое покрытие отличается от внешней оболочки термомеханическими постоянными и, в первую очередь, коэффициентами термического расширения. Показано, что если коэффициент термического расширения внутреннего покрытия меньше коэффициента термического расширения внешней оболочки и изделие находится при температуре меньшей температуры нанесения покрытия, то во внутреннем покрытии возникают сжимающие напряжения. Это значительно упрочняет хрупкое внутреннее покрытие. Сравнение расчетных значений прочности покрытия с экспериментальными данными показало их хорошее согласие.

Покрытие; осевые и окружные температурные напряжения; коэффициент термического расширения; упрочнение.

V.A. Zhornik, Yu.A. Prokopenko

MODELLING OF COVERING PROCESSES ON CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF MEDICAL APPARATUSES

Temperature stresses arising in a two-layered cylinder in which inner fragile covering differs from the outer one by thermal constants and mostly by thermal expansion coefficients are examined. It is shown that if the thermal expansion coefficient of the inner covering is less than the same of the outer one and the item is at temperature lower than the covering temperature then the compressive stresses arise in the inner covering. This considerably strengthens fragile inner covering. The numeral values comparison with the experimental data shown their good agreement.

Covering; axial and hoop temperature stresses; thermal expansion coefficient; hardening.

Элементы конструкций различных медицинских приборов часто представляют собой соединения из материалов с различными термомеханическими постоянными (модули упругости, коэффициенты Пуассона, коэффициенты термическо-

¹ Работа одного из авторов, Жорник В.А., выполнена при поддержке гранта «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) Министерства образования и науки Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) (код проекта Р.Н.П. 2.22.3.10012).

го расширения и т. д.). Эти конструкции помимо воздействий силовых нагрузок функционируют в различных температурных режимах, следствием которых являются температурные напряжения. Эти напряжения вблизи различных неоднородностей резко возрастают, что может привести к разрушению. Следовательно, изучение процессов в таких элементах имеет важное значение.

В данной работе для исследования в качестве модели выбран двухслойный полый цилиндр относительно большой длины (длина цилиндра значительно больше толщины стенки двухслойного цилиндра). Внутренний радиус внутреннего цилиндра $1 - r_0$, внешний радиус контакта $- r_c$. Внешний радиус внешнего цилиндра $2 - R$.

В предположении, что поверхности цилиндра свободны от нагрузок, температурное поле в цилиндре является функцией радиуса r к времени t , температурные напряжения вдали от торцов цилиндра были получены в работе авторов [1].

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(1)}(r,t) = & \frac{\alpha_{T_1} E_1}{1-\nu_1} \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 - r_0^2}{r_c^2 - r_0^2} \int_{r_0}^r T_1(\rho,t) \rho d\rho - \int_{r_0}^r T_1(\rho,t) \rho d\rho \right] + \\ & + \frac{(\eta + \gamma) + (\chi - 1) \left(1 + 2 \frac{\gamma}{\beta} \right) \gamma}{\eta\beta - 2\gamma^2} \delta\mu \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi}^{(1)}(r,t) = & \frac{\alpha_{T_1} E_1}{1-\nu_1} \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 + r_0^2}{r_c^2 - r_0^2} \int_{r_0}^r T_1(\rho,t) \rho d\rho + \int_{r_0}^r T_1(\rho,t) \rho d\rho - T_1(r,t) r^2 \right] + \\ & + \frac{(\eta + \gamma) + (\chi - 1) \left(1 + 2 \frac{\gamma}{\beta} \right) \gamma}{\eta\beta - 2\gamma^2} \delta\mu \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sigma_{zz}^{(1)}(r,t) = \frac{\alpha_{T_1} E_1}{1-\nu_1} \left[\frac{2}{r_c^2 - r_0^2} \int_{r_0}^{r_c} T_1(\rho,t) \rho d\rho - T_1(r,t) \right] + \frac{\beta + 2\gamma}{\eta\beta - 2\gamma^2} \delta\mu \chi, \quad r_0 \leq r \leq r_c, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(2)}(r,t) = & \frac{\alpha_{T_2} E_2}{1-\nu_2} \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 - r_c^2}{R^2 - r_c^2} \int_{r_c}^R T_2(\rho,t) \rho d\rho - \int_{r_c}^r T_2(\rho,t) \rho d\rho \right] + \\ & + \frac{(\eta + \gamma) + (\chi - 1) \left(1 + 2 \frac{\gamma}{\beta} \right) \gamma}{\eta\beta - 2\gamma^2} \delta \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi}^{(2)}(r,t) = & \frac{\alpha_{T_2} E_2}{1-\nu_2} \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 + r_c^2}{R^2 - r_c^2} \int_{r_c}^R T_2(\rho,t) \rho d\rho + \int_{r_c}^r T_2(\rho,t) \rho d\rho - T_2(r,t) r^2 \right] + \\ & + \frac{(\eta + \gamma) + (\chi - 1) \left(1 + 2 \frac{\gamma}{\beta} \right) \gamma}{\eta\beta - 2\gamma^2} \delta \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sigma_{zz}^{(2)}(r,t) = \frac{\alpha_{T_2} E_2}{1-\nu_2} \left[\frac{2}{R^2 - r_c^2} \int_{r_c}^r T_2(\rho,t) \rho d\rho - T_2(r,t) \right] + \frac{\beta + 2\gamma}{\eta\beta - 2\gamma^2} \delta\chi, \quad r_c \leq r \leq R, \quad (6)$$

где E_1, E_2 – модули упругости материалов цилиндров; ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона; $\alpha_{T_1}, \alpha_{T_2}$ – их коэффициенты термического расширения,

$$\mu = \frac{r_c^2 - R^2}{r_c^2 - r_0^2}, \quad \gamma = \mu \frac{\nu_1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2}, \quad \eta = \frac{\mu}{E_1} - \frac{1}{E_2},$$

$$\beta = \mu \left(1 + \frac{r_0^2}{r_c^2} \right) \frac{1}{E_2} + \left(1 - \frac{R^2}{r_c^2} \right) \left(\frac{\nu_2}{E_2} - \frac{\nu_1}{E_1} \right) - \left(1 + \frac{R^2}{r_c^2} \right) \frac{1}{E_2},$$

$$\delta = \alpha_{T_2} \frac{2}{R^2 - r_c^2} \int_{r_c}^R [T_2(\rho,t) - T_n] \rho d\rho - \alpha_{T_1} \frac{2}{r_c^2 - r_0^2} \int_{r_0}^{r_c} [T_1(\rho,t) - T_n] \rho d\rho,$$

T_n – температура, при которой образуется соединение цилиндров; χ – степень сцепления на контактной поверхности ($r = r_c$) между цилиндрами. При $\chi = 0$ сцепление на контактной поверхности цилиндров отсутствует. Они проскальзывают друг относительно друга, и осевые напряжения в каждом из цилиндров образуют самоуравновешенную систему сил (цилиндры соединены с натягом). При $\chi = 1$ между цилиндрами на контактной поверхности существует полное сцепление (спай). В этом случае осевые деформации цилиндров одинаковы и осевые напряжения во всем двухслойном цилиндре образуют самоуравновешенную систему сил. При $0 < \chi < 1$ наблюдается частичное проскальзывание. Из выражений (1 – 6) видно, что температурные напряжения состоят из двух слагаемых. Первые связаны с температурными градиентами в каждом из цилиндров и исчезают при отсутствии градиентов. Вторые слагаемые связаны с различием термомеханических постоянных и, прежде всего, с различием коэффициентов термического расширения материалов цилиндров α_{T_1} и α_{T_2} . Эти напряжения не исчезают даже при постоянной температуре цилиндров. В частности, при температуре окружающей среды $T_1(r,t) = T_2(r,t) = \theta$ в выражениях для напряжений (1 – 6) первые слагаемые обращаются в нуль, а во вторых слагаемых $\delta = (\alpha_{T_2} - \alpha_{T_1})(\theta - T_n)$ и поэтому в этом случае напряжения обращаются в нуль только при $\alpha_{T_2} = \alpha_{T_1}$ или при $\theta = T_n$.

Для проверки данных выражений для напряжений они были применены для расчета термостойкости стеклометаллических цилиндров (стальной цилиндр с внутренним стеклянным покрытием – стекло №1), полученных при температуре нанесения 973 К. Метод испытания на термостойкость таких цилиндров с теплоизолированными торцами [2] заключается в нагревании их в специальной печи до некоторой температуры T_0 , выдержки при этой температуре для равномерного прогрева и резком охлаждении в среде (воде) при температуре θ . Максимальная разность температур $T_0 - \theta$, при которой стеклянное покрытие не разрушается, принимается за меру термостойкости.

Как показал анализ формул (1 – 6) [1] и эксперимент [2] (возникающие в стеклянном покрытии трещины имели кольцевую форму), наиболее опасными оказались осевые напряжения в стеклянном цилиндре $\sigma_{zz}^{(1)}$. Поэтому осевые напряжения $\sigma_{zz}^{(1)}$ использовались для исследования термостойкости двухслойного цилиндра.

На рис. 1 изображена зависимость термостойкости стеклянного покрытия в зависимости от степени сцепления металла со стеклом χ при двухстороннем охлаждении, рассчитанном по (3).

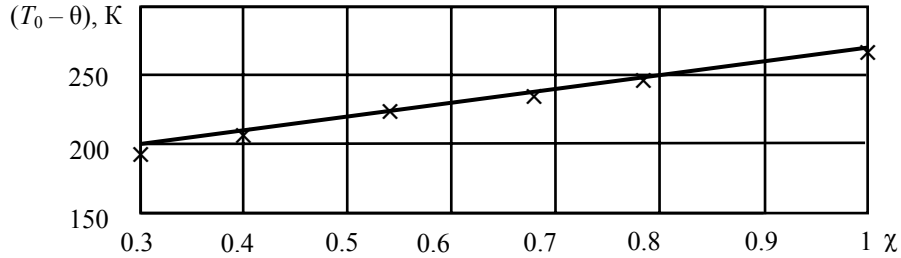


Рис. 1. Зависимость термостойкости $T_0 - \theta$ стеклянного покрытия от степени сцепления контактных поверхностей χ (× – экспериментальные точки, сплошная линия – теоретическая зависимость)

Из рис. 1 видно, что при степени сцепления $\chi = 0,54$ термостойкость $T_0 - \theta = 230$ К. Используя этот результат, в данной работе исследуется прочность стеклометаллического цилиндра в обычных условиях.

В работе [3] после получения двухслойных цилиндров их проверяли на прочность при комнатной температуре $\theta = 293$ К путем поперечного раздавливания. При этом наиболее опасными оказались окружные напряжения в покрытии $\sigma_{\text{фф}}^{(1)}$ (в эксперименте трещины начинали расти с торцов вдоль оси цилиндра).

Для того чтобы образовались осевые трещины, окружные напряжения $\sigma_{\text{фф}}$ при поперечном раздавливании должны превысить напряжения сжатия $\sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c)$, рассчитанные по (2) при $T_1(r,t) = T_2(r,t) = \theta$ и прочность на растяжение неорганического стекла σ :

$$\sigma_p = \sigma - \sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c). \quad (7)$$

Прочность неорганического стекла на растяжение σ измерялась в [4]. Измерение прочности стеклянных покрытий проводилось методом чистого изгиба и разрушение начиналось с краёв. При этом оказалось, что прочность σ имеет большой разброс значений от 25 МПа до 100 МПа и даёт нормальное распределение с максимумом при ~ 60 МПа.

$\sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c)$, как уже было сказано выше, рассчитывается по (2) при $T_1(r,t) = T_2(r,t) = \theta$ и имеет вид

$$\sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c) = \frac{\eta + \gamma + (\chi - 1) \left(1 + 2 \frac{\gamma}{\beta} \right) \gamma}{\eta \beta - 2\gamma^2} \mu (1 + m^2) (\alpha_{T_2} - \alpha_{T_1}) (\theta - T_n), \quad (8)$$

где $m = r_0/r_c$.

Для расчета окружных напряжений по (8) использовались следующие численные значения геометрических и термомеханических постоянных $r_0 = 13,5 \times 10^{-3}$ м; $r_c = 14 \times 10^{-3}$ м; $R = 16 \times 10^{-3}$ м; $E_1 = 0,68 \times 10^5$ МПа; $E_2 = 2 \times 10^5$ МПа; $\nu_1 = 0,22$; $\nu_2 = 0,28$; $\alpha_{T_1} = 89 \times 10^{-7}$ 1/К; $\alpha_{T_2} = 146 \times 10^{-7}$ 1/К; $T_n = 783$ К; $\theta = 293$ К; $\chi = 0,54$.

Подставляя в (8) указанные вышечисленные значения, получаем, что окружное напряжение на контакте равно $\sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c) = -200$ МПа.

Подставляя это значение $\sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c)$ в (7), получим эффективную прочность σ_p стеклянного цилиндра в сжимающей его металлической оболочке. Используя это значение $\sigma_{\text{фф}}^{(1)}(r_c)$ и функцию распределения, приведённую в [4], находим функцию распределения эффективной прочности σ_p стеклянного покрытия в металлической оболочке, которая изображена на рис. 2.

На этом же рисунке изображены экспериментальные значения из [3].

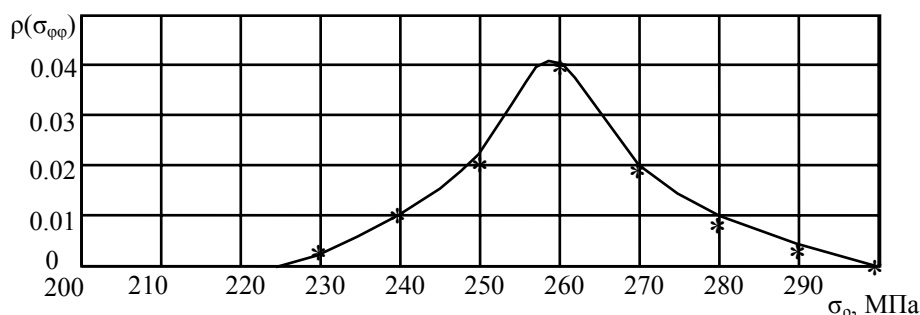


Рис. 2. Распределение прочности остеклованных металлических труб на поперечное раздавливание (сплошная линия – теория * – эксперимент)

В таблице для разных марок стёкол приведены теоретические и экспериментальные значения средней прочности стеклометаллических цилиндров.

Таблица

Сравнение теоретических и экспериментальных значений средней прочности стеклометаллических цилиндров

Марка стекла \ Прочность	№1	№9	БД-1	№23	Ц-32	С-88-13	№14	Т-53	13-в	Пирекс
	σ_p (теор) МПа	260	224	225	234	234	308	193	360	474
σ_p (эксп) МПа	260	230	200	220	250	300	180	320	470	500

Как видно из таблицы, имеет место совпадение теоретических и экспериментальных значений. Причём прочность стеклянного покрытия значительно увеличивается благодаря сжимающим напряжениям, возникающим в основном за счет разности коэффициентов термического расширения неорганического стекла и металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жорник В.А., Прокопенко Ю.А. Температурные напряжения в двухслойных цилиндрах // Наука и технологии. Т. I. Труды XXVIII Российской школы. – М.: РАН, 2008. – С. 62-70.
2. Кулямина Л.Л., Жорник А.И. Термическая устойчивость внутреннего стеклянного покрытия на стальных трубах // Стекло. – 1968. – №3. – С. 15-21.
3. Кулямина Л.Л. Исследование факторов, определяющих прочность стеклянного покрытия на внутренней поверхности стальных труб // Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1968. – 218 с.
4. Бартнев Г.М. Механические свойства и тепловая обработка стекла. М.: Стройиздат, 1960. – 166 с.

Жорник Виктория Александровна

Таганрогский государственный педагогический институт.

E-mail: zhornik@land.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48, тел.: (8634)601807.

Доцент, к.ф.-м.н.

Zhornik Victoria Aleksandrovna

Taganrog State Pedagogical Institute.

E-mail: zhornik@land.ru.

48, Initsyativnaya str., Taganrog, 347900, Russia, Phone: (8634)601807.

Assistant professor, PhD.

Прокопенко Юрий Александрович

Таганрогский государственный педагогический институт.

E-mail: uranum83@mail.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48, тел.: (8634)601807.

Ассистент.

Prokopenko Yury Aleksandrovich

Taganrog State Pedagogical Institute.

E-mail: uranum83@mail.ru.

48, Initsyativnaya str., Taganrog, 347900, Russia, Phone: (8634)601807.

Assistant.

УДК 539.04

В.А. Жорник, А.А. Ященко**РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕДИЦИНСКИХ
ПРИБОРОВ***

Рассматривается развитие трещиноподобного дефекта дискообразной формы под действием термоупругих напряжений в элементах конструкций медицинских приборов. Показано, что мельчайший внутренний дефект при термообработке может вырасти скачком до размеров опасных при дальнейшей эксплуатации.

Температура; термоупругие напряжения; дискообразная трещина; коэффициент интенсивности напряжений.

V.A. Zhornik, A.A. Yashchenko**CRACK-LIKE DEFECT PROPAGATION IN CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF
MEDICAL APPARATUSES OF CYLINDRICAL SHAPE**

Crack-like penny-shaped defect propagation under thermoelastic stresses in constructive elements of medical apparatuses is considered. It is shown that the smallest inner defect under heat treatment may grow jump-like up to the sizes dangerous for further use.

Temperature; thermal stresses; penny-shaped crack; stress intensity factor.

В процессе нанесения упрочняющих, восстанавливающих и антикоррозионных покрытий на рабочие поверхности элементов конструкций они довольно

* Работа одного из авторов, Жорник В.А., выполнена при поддержке гранта «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) Министерства образования и науки Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) (код проекта Р.Н.П. 2.22.3.10012).