

Lugovoy Evgeny Vladimirovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: euglugovoy@yandex.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +7604695926; +78634371940.

Serba Pavel Victorovich

E-mail: serba@tsure.ru.

Petrov Sergey Nicolaevich

“Scientific production association of space device making "Kwant".

E-mail: sinoptic60@mail.ru.

7, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090.

Phone: 8632240656; +79885100614.

УДК 53.004

В.А. Жорник, Ю.А. Прокопенко

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ СТЕКЛЯННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ТРУБ**

Рассматриваются процессы, происходящие на контактной поверхности при получении покрытий из неорганического стекла на внутренних поверхностях металлических труб. Вводится граничное условие, характеризующее степень проскальзывания труб относительно друг друга. Проводится сравнение расчетных характеристик напряженного состояния цилиндров с экспериментальными данными.

Покрытие; осевые температурные напряжения; коэффициент термического расширения.

V.A. Zhornik, Yu.A. Prokopenko

**GLASS COATING OF METAL TUBES' INNER SURFACES PROCESS
MODELING**

Processes occurring on the contact surface at nonorganic glass covering obtaining on inner surfaces of metallic tubes are considered. Boundary condition characterizing the slipping rate of the tubes one against another is introduced. Comparison of calculated stress state characteristics of the cylinders with experimental data is performed.

Covering; axial temperature stresses; thermal expansion coefficient.

Металлические трубы с внутренним стеклянным покрытием находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Одним из методов нанесения покрытий является баллонный метод, который заключается в раздувании стеклянного баллона внутри металлической трубы, разогретой до температуры нанесения покрытия T_n , выдержки при ней и медленного охлаждения изделия. Составы стекол для внутренних покрытий подбираются с таким расчетом, чтобы коэффициент термического расширения стекла был ниже коэффициента термического расширения металла. Из-за этой разницы в стеклянном покрытии создавались напряжения сжатия, положительно влияющие на рабочие свойства покрытий [1].

Экспериментальные [2] и теоретические [3] исследования процессов нанесения покрытий из стекла на внутренние поверхности стеклянных труб показали, что

термомеханическим и прочностным требованиям в основном удовлетворяет стекло марки №1, полученное на опытном стекольном заводе государственного института стекла (ГИС). Химический состав этого стекла приведен в [2]. Термомеханические постоянные материалов стеклянных покрытий и металлических труб приведены ниже: стекло № 1 (индекс 1); сталь 10 (индекс 2).

Модули упругости $E_1 = 6,644 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $E_2 = 19,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; коэффициенты термического расширения $\alpha_{T_1} = 89 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_{T_2} = 146 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$; коэффициенты Пуассона $\nu_1 = 0,22$, $\nu_2 = 0,28$; плотности $\rho_1 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; удельные теплоемкости $c_1 = 960 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $c_2 = 500 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$; теплопроводности $\lambda_{T_1} = 878 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $\lambda_{T_2} = 57 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; температура стеклования $T'_g = 773 \text{ К}$; температура охлаждающей среды $\theta = 293 \text{ К}$. Размеры цилиндров: внешний радиус стальной трубы $R = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; внутренний радиус стальной трубы (внешний радиус стеклянной) $r_c = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, внутренний радиус стеклянного покрытия $r_0 = 13,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

При нанесении покрытий важную роль играет температурный режим этого процесса. При низких температурах нанесения покрытий ($T_n \sim 893 \text{ К}$) раздувание баллона происходит плавно и равномерно, покрытие получается хорошего качества, без пузырей. Однако образцы, полученные при таких температурах, обладали сравнительно низкими термостойкими и прочностными свойствами. При микроскопических исследованиях колец остеклованных труб выявилось неплотное прилегание стеклянной оболочки к металлической трубе. Между стеклом и металлом была замечена воздушная прослойка, невидимая невооруженным глазом. Образцы, полученные при относительно высоких температурах нанесения покрытий ($T_n \sim 1093 \text{ К}$), имели более высокие прочностные и термостойкие характеристики. Увеличение этих характеристик при больших температурах нанесения покрытий связано с увеличением прочности сцепления стекла с металлом на контакте. При исследовании под микроскопом границы стекло-металл колец остеклованных металлических труб, полученных при этой температуре, наблюдалась коррозия стали как результат химического взаимодействия стекла с металлом. Мельчайшие выступы на поверхности стали заполнены стеклом. Однако технология получения остеклованных труб при высоких температурах ($T_n \sim 1093 \text{ К}$) весьма затруднительна. Это связано с несколькими причинами. При нанесении покрытий на длинные трубы зона наивысшей температуры растянута, и сильный нагрев приводит к неравномерному раздуванию баллона вследствие кратковременности процесса нагрева. Увеличение же времени нагрева при таких высоких температурах приводит к усиленному выделению углерода из стали. Газообразный CO_2 не может проникнуть через высоковязкую оболочку стекла наружу, в результате чего образуются пузыри на покрытии. Кроме того, при высоких температурах нанесения покрытий длинные металлические трубы деформируются.

Анализируя указанное выше, в [2] для нанесения покрытий из стекла № 1 рекомендуется оптимальная температура 973 К . В этом случае с одной стороны стекло не пузырится, а с другой – относительно плотно прижато к металлической оболочке (не все мельчайшие углубления заполнены стеклом). Однако химического взаимодействия между стеклом и металлом не наблюдается. Сцепление стекла со сталью в данном случае можно, вероятно, объяснить механическим закреплением его в углублениях поверхности металла, что хорошо наблюдалось под микроскопом. В связи с определением степени сцепления стекла с металлом необходимо было провести экспериментальные и теоретические исследования термонапряжен-

ного состояния стеклометаллических цилиндров во всем интервале температур нанесения покрытия от 893 до 1093 К.

Для определения прочности сцепления стекла с металлом в [2] использовались металлические пластинки стали 10, прошедшие химическую очистку, и стеклянные пластинки стекла № 1. Стальная и стеклянная пластинки складывались вместе, помещались в печь и при определенной температуре T_n нанесения выдерживались под нагрузкой, эквивалентной избыточному давлению нагретого воздуха внутри баллона при баллонном способе нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы. Соотношения толщин стеклянной и стальной пластинок сохранялись такими же, как для остеклованных труб. После определенной выдержки стальная пластинка вместе с прилипшей к ней стеклянной пластинкой извлекалась из печи и охлаждалась на воздухе. При остывании до определенной температуры нарушался контакт между пластинами.

При температуре формирования покрытия, равной температуре стеклования $T'_g = 773\text{ K}$, контакта между пластинами не образовывалось. Наоборот, при температуре формирования покрытия $T_n \sim 1093\text{ K}$ отслаивания при охлаждении не происходило вплоть до комнатной температуры, а при испытании на разрушение двухслойной пластинки происходило растрескивание самого покрытия (когезионный разрыв).

Из проведенного анализа экспериментальных данных следует, что две точки зависимости степени сцепления металла со стеклом известны относительно точно. А именно: при температуре нанесения покрытия при температуре стеклования $T'_g = 773\text{ K}$ стеклянный баллон почти не раздувается, и поэтому сцепления между стеклом и металлом не образуется (степень сцепления $\chi = 0$). При температуре нанесения покрытия $T_n \sim 1093\text{ K}$ сцепление между металлом и стеклом полное (спай). В этом случае степень сцепления равна единице ($\chi = 1$).

Приведенные выше экспериментальные исследования зависимости прочностных характеристик контактной поверхности от температуры нанесения покрытия позволяют построить модель сцепления стекла и металла на контактной поверхности стеклометаллической трубы. При охлаждении стеклоконструкции от температуры нанесения покрытия до температуры нарушения контакта стеклоконструкция работает как спай. Однако ниже этой температуры за счет шероховатости контактных поверхностей между ними возникает сухое (кулоново) трение (частичное проскальзывание цилиндров относительно друг друга). Причем чем выше температура нанесения покрытия, тем более шероховатой становится поверхность контакта и тем затруднительнее её проскальзывание. При температуре нанесения покрытия, равной температуре стеклования $T_n = T'_g \sim 773\text{ K}$, силы сцепления отсутствуют, и поэтому наблюдается идеальное проскальзывание (соединение цилиндров с натягом), цилиндры в осевом направлении уравнивают сами себя. При температуре нанесения покрытия, равной $T_n \sim 1093\text{ K}$ сцепление стекла с металлом полное (спай). В этом случае сцепление между поверхностями не нарушается даже при охлаждении конструкции до комнатной температуры и изделие работает без проскальзывания на контакте. В связи с этим на контактной поверхности вдали от торцов вводится граничное условие для осевой деформации ϵ_{zz} :

$$\epsilon_{zz}^{(2)} - \epsilon_{zz}^{(1)} = (1 - \chi)\Delta\epsilon_{zz}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{zz}^{(1,2)}$ – осевые деформации стеклянного и металлического цилиндров; соответственно $\Delta\varepsilon_{zz}$ – разность осевых деформаций в случае отсутствия сцепления ($\chi = 0$), которая определяется из решения задачи о напряженном состоянии цилиндров при условии, что каждая из труб сама себя уравнивает в осевом направлении, χ – степень сцепления стекла и металла на контакте (степень проскальзывания контактных поверхностей).

Для определения степени сцепления в температурном интервале нанесения покрытия ($893K - 1093K$) воспользуемся экспериментальными [4] и теоретическими [3] исследованиями термостойкости этих изделий. При испытании на термостойкость образец остеклованной трубы нагревался до определенной температуры T_0 , выдерживался некоторое время при ней до полного прогрева и далее охлаждался в воде при температуре θ . За меру термостойкости принималась разность температур $T_0 - \theta$, при которой покрытие начинало разрушаться. При этом испытывались образцы при внутреннем и двухстороннем охлаждении, полученные при разных температурах нанесения покрытия. На рис. 1 приведены экспериментальные точки зависимости средней термостойкости от температуры нанесения покрытия. На каждую экспериментальную точку бралось 50 образцов.

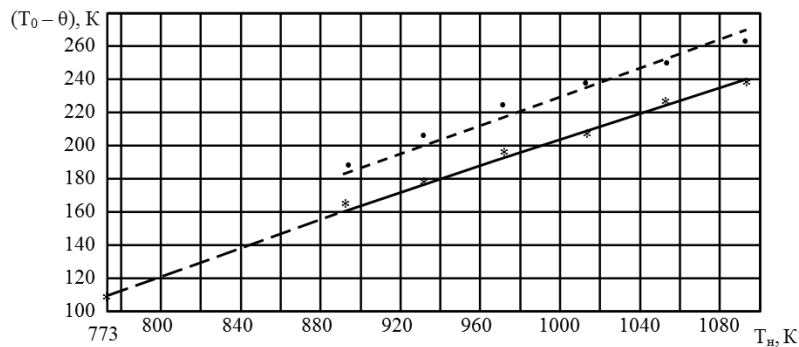


Рис. 1. Зависимость термостойкости покрытия от температуры его нанесения.
* – внутреннее охлаждение, • – двухстороннее охлаждение ($n = 50$)

Из рис. 1 видно, что при внутреннем охлаждении все точки укладываются на прямую. Причем при $T_n = 1093 K$ при полном сцеплении стекла и металла ($\chi = 1$) средняя термостойкость при внутреннем охлаждении равна $T_n \sim 240 K$, а при $T_n = 773 K$ ($\chi = 0$) средняя термостойкость равна $T_n \sim 110 K$.

В работе авторов [3] термостойкость этих конструкций исследовалась теоретическим путем, в которой рассчитывались температурные поля и температурные напряжения, возникающие в двухслойном, в частности стеклометаллическом, цилиндре, с учетом степени проскальзывания контактных поверхностей. В этой работе показано, что наиболее опасными, вызывающими разрушение стеклянного покрытия, являются осевые напряжения σ_{zz} на внутренней поверхности покрытия при $r = r_0$. За меру термостойкости покрытия $T_0 - \theta$ принималась разность температур, при которой на внутренней поверхности покрытия максимальные по времени осевые напряжения достигают технической прочности стекла, измеренной в

горячей воде [5]. В этой работе была получена формула для расчета термостойкости, которая имеет вид

$$T_0 - \theta = \frac{(\sigma + A)}{\sigma_{zz}^*(m, Fo)_{\max}} \frac{1 - \nu_1}{\alpha_{T_1} E_1}, \quad (2)$$

где $\sigma = 56,3 \text{ МПа}$ – прочность на растяжение стекла в воде;

$$A = \frac{(\beta + 2\gamma)\mu\chi(\alpha_{T_2} - \alpha_{T_1})(T'_g - \theta)}{\eta\beta - 2\gamma^2}; \quad \mu = \frac{r_c^2 - R^2}{r_c^2 - r_0^2}; \quad \eta = \mu \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2}; \quad \gamma = \mu \frac{\nu_1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2};$$

$$\beta = \mu \left(1 + \frac{r_0^2}{r_c^2}\right) \frac{1}{E_1} + \left(1 - \frac{R^2}{r_c^2}\right) \left(\frac{\nu_2}{E_2} - \frac{\nu_1}{E_1}\right) - \left(1 + \frac{r_0^2}{r_c^2}\right) \frac{1}{E_2}; \quad m = \frac{r_0}{r_c}; \quad Fo = \frac{a_1 t}{r_c^2};$$

$a_1 = \frac{\lambda_{T_1}}{\rho_1 c_1}$ – температуропроводность стекла; $\sigma_{zz}^*(m, Fo)$ – безразмерное осевое

напряжение на поверхности покрытия.

Зависимость $\sigma_{zz}^*(m, Fo)$ от времени Fo приведена на рис. 2,а для двухстороннего охлаждения и на рис. 2,б для внутреннего охлаждения с учетом вышеуказанных термомеханических постоянных материалов и их размеров при интенсивностях охлаждения $Bi_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda_T} r_0 = 380$ и $Bi_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda_{T_2}} \frac{1}{1 + \frac{\alpha_2 d}{\lambda_{T_2}}} r_c = 210$, где коэффициенты теплообмена α_1 и α_2 согласно [6] равны $\alpha_1 = \alpha_2 = 25 \cdot 10^3 \text{ BT}/\text{м}^2 \text{ К}$.

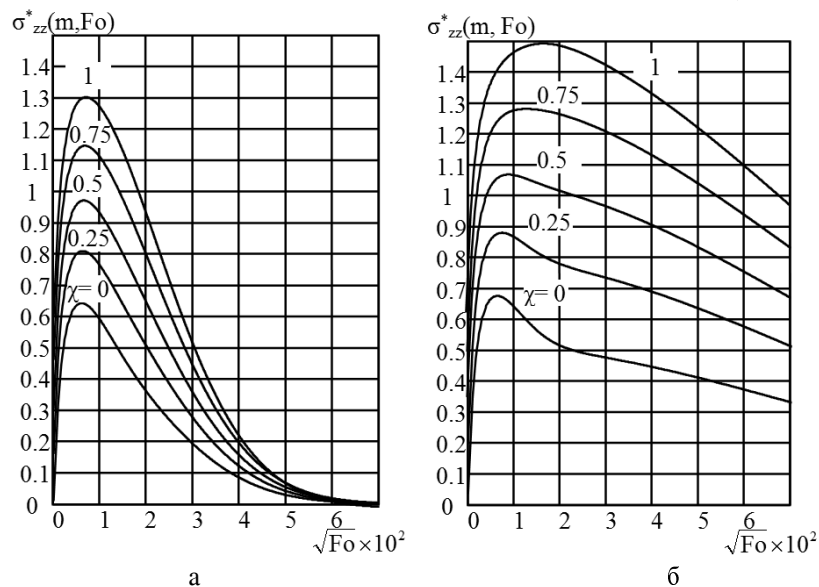


Рис. 2. Зависимость осевого напряжения на поверхности покрытия от времени при различных степенях проскальзывания (а – двухстороннее, б – внутреннее охлаждение)

Из этих рисунков видно, что $\sigma_{zz}^*(m, Fo)_{\max}$ в зависимости от степени сцепления χ можно представить в виде

$$\sigma_{zz}^*(m, Fo)_{\max} = 0,65(1 + \chi), \quad (3)$$

$$\sigma_{zz}^*(m, Fo)_{\max} = 0,67 + 0,83\chi. \quad (4)$$

Формула (3) – для двухстороннего охлаждения, (4) – для внутреннего охлаждения.

Поэтому, подставив (3) в (2), получим зависимость термостойкости от степени сцепления при двухстороннем охлаждении стеклоконструкции:

$$T_0 - \theta = \frac{(\sigma + A)}{0,65(1 + \chi)} \frac{1 - \nu_1}{\alpha_T E_1}, \quad (5)$$

а подставив (4) в (2), имеем зависимость термостойкости от степени сцепления при внутреннем охлаждении стеклоконструкции:

$$T_0 - \theta = \frac{\sigma + A}{0,67 + 0,83\chi} \frac{1 - \nu_1}{\alpha_T E_1}. \quad (6)$$

С учетом вышеуказанных термомеханических постоянных и размеров цилиндров (6) принимает вид

$$T_0 - \theta = \frac{56,3 + 219\chi}{(0,67 + 0,83\chi)0,760} K. \quad (7)$$

Выражение (7) хорошо описывает крайние точки вышеуказанной зависимости степени сцепления металла со стеклом χ от температуры нанесения покрытия T_n . В самом деле, как говорилось выше, при температуре нанесения покрытия $T_n = T'_g = 773 K$ степень сцепления $\chi = 0$, а при $T_n = 1093 K$ $\chi = 1$. Поэтому, подставив $\chi = 0$ в (7), получим $T_0 - \theta = 111 K$, в то время как, согласно рис. 1, для внутреннего охлаждения (точки *) $T_0 - \theta = 110 K$ при $T_n = 773 K$. Подставив $\chi = 1$ ($T_n = 1093 K$) в (7), получим $T_0 - \theta = 241 K$, что согласуется с экспериментальным значением на рис. 1 для внутреннего охлаждения $T_0 - \theta = 240 K$. Поэтому (7) позволяет с использованием зависимостей $T_0 - \theta$ от T_n , изображенных на рис. 1 (точки *), найти зависимость χ от T_n . Для этого необходимо из (7) выразить χ через $T_0 - \theta$:

$$\chi = \frac{0,509(T_0 - \theta) - 56,3}{219 - 0,631(T_0 - \theta)}. \quad (8)$$

Подставив в (8) экспериментальные точки (*), из рис. 1 найдем, что при $T_n = 893 \text{ K}$ $T_0 - \theta = 170 \text{ K}$. Поэтому, согласно (8), $\chi = 0,27$ и т.д.

Таким образом, при $T_n = 773 \text{ K}$ $\chi = 0$, при $T_n = 893 \text{ K}$ $\chi = 0,27$, при $T_n = 933 \text{ K}$ $\chi = 0,34$, при $T_n = 973 \text{ K}$ $\chi = 0,49$, при $T_n = 1013 \text{ K}$ $\chi = 0,58$, при $T_n = 1053 \text{ K}$ $\chi = 0,82$, при $T_n = 1093 \text{ K}$ $\chi = 1$.

Используя полученные выше данные зависимости χ от T_n , проведем сравнение теоретической зависимости (5) термостойкости $T_0 - \theta$ от χ , а значит, от T_n при двухстороннем охлаждении с экспериментальными данными (•) на рис. 1. Теоретическая зависимость по (5) показана на рис. 1 в виде пунктирной линии. Как видно из рисунка, теоретическая зависимость относительно хорошо совпадает с экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров А.Б., Кулямина Л.Л., Жорник А.И. Распределение напряжений во внутреннем стеклянном покрытии стальных труб из-за различия коэффициентов расширения стекла и металла // Стекло. – 1966. – № 2. – С. 51-59.
2. Кулямина Л.Л. Исследование фактов, определяющих прочность стеклянного покрытия на внутренней поверхности стальной трубы // Дис... канд. техн. Наук. – М., 1968. – 218 с.
3. 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.
4. Кулямина Л.Л., Жорник А.И. Термическая устойчивость внутреннего стеклянного покрытия на стальных трубах // Стекло. 1968. – № 3. – С. 51-59.
5. Бартнев Г.М. Механические свойства и тепловая обработка стекла. – М.: Стройиздат, 1960. – 166 с.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1970. – 659 с.

Жорник Виктория Александровна

ГОУ ВПО «Таганрогский государственный педагогический институт».

E-mail: zhornik_victoria@mail.ru.

347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48.

Тел.: 88634601807.

Прокопенко Юрий Александрович

E-mail: uranum83@mail.ru.

Zhornik Victoria Aleksandrovna

Taganrog State pedagogical Institute.

E-mail: zhornik_victoria@mail.ru.

48, Iniciativnaya street, Taganrog, 347936, Russia.

Phone: +78634601807.

Prokopenko Yury Aleksandrovich

E-mail: uranum83@mail.ru.