УДК 629.584

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ИЗ НОВОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА – СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТА

© 2016 В.К. Гончарук, А.А. Бочарова, А.А. Ратников

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Статья поступила в редакцию 29.03.2016

В работе представлено описание установки для изготовления оболочек из стеклометаллокомпозита, полученный подход к формированию стеклянного слоя без поверхностных микротрещин не имеет аналогов в мировой практике устранения поверхностных микротрещин в стекле. На основе метода физической дискретизации построена схема расчёта для определения остаточных напряжений на стыках слоев.

Ключевые слова: стеклометаллокомпозит, цилиндрическая оболочка, корпус, конструкционный материал

Повышение конкурентоспособности перспективных средств морского, подводного и авиакосмического транспорта требует применения принципиально новых конструкционных материалов с существенно улучшенными эксплуатационными характеристиками. Таким материалом является изобретённый профессором Пикулем В.В. новый композиционный наноматериал на основе стекла - стеклометаллокомпозит (СМК), обладающий высокими прочностными характеристиками при условии, что плотность материала не превышает плотности алюминиевых сплавов. СМК представляет собой композиционный материал, состоящий из стеклянного слоя, заключённого между металлическими облицовками [1]. В процессе его изготовления обеспечивается надёжное соединение стекла с металлом и создаются необходимые условия для формирования стеклянного слоя без поверхностных микротрещин. Сущность способа его изготовления состоит в том, что пространство между металлическими обшивками заполняется расплавом стекломассы, при остывании стеклянный слой обжимается за счёт более интенсивного сокращения размеров внешней металлической обшивки, не допуская появления поверхностных деформаций растяжения стекла. Тем самым создаются условия для надёжного соединения образуемого стеклянного слоя с облицовками и исключения образования поверхностных микротрещин в стекле.

Исследования эффективности применения СМК в глубоководной технике показали, что из него могут быть изготовлены прочные корпуса, способные обеспечить необходимую плавучесть глубоководной технике вплоть до предельных глубин Мирового океана [2]. На способы изготовления изделий из СМК получено 5 патентов РФ на изобретения [3-7].

Экспериментальная установка. Для изготовления слоистых цилиндрических оболочек металлстекло-металл методом центрифугирования создана лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 1. В качестве металла для металлических облицовок выбраны материалы, обладающие химическим сродством: алюминий и силикатное стекло.



Рис. 1. Схема изготовления цилиндрической оболочки из СМК:

1 – внешняя металлическая облицовка; 2 – стеклянный слой; 3
 внутренняя металлическая облицовка; 4 – торцевые металлические облицовки; 5 – форма; 6 – центрифуга

Изготовление цилиндрической оболочки осуществляют следующим образом. В форму помещают предварительно подготовленные к соединению со стеклянным слоем, внешнюю металлическую облицовку и торцевые металлические облицовки, нагревают её до температуры 400-500°С и помещают в центрифугу. При вращающейся в пределах 3000-5000 об/мин центрифуге внутрь формы подают расплав стекла при температуре 1400-1500°С для формирования стеклянного слоя, исходя из возможности получения стеклянного слоя толщиной 5 мм. Температуру стеклянного слоя понижают до температуры 800°С, обеспечивающей его надежное соединение с расплавом металла внутренней металлической облицовки, затем на стеклянный слой подают расплав металла, разогретого до температуры 800°С, для формирования внутренней облицовки. Посредством центрифугирования формируют требуемой толщины металлическую облицовку (1 мм) и стеклянный слой (5мм).

Для обеспечения равномерной толщины стеклянного слоя СМК цилиндрическую оболочку остужают до температуры стеклования стеклянного слоя (550°С) при работающей центрифуге. Отключают центрифугу и производят отжиг цилиндрической оболочки при температуре стеклования до полной релаксации напряжений и стабилизации свойств стеклянного слоя. Цилиндрическую оболочку остужают до температуры внешней среды и извлекают её из формы. Такая операция обеспечивала равномерность заливки стекла и мгновенное распределение расплава по всей внутренней поверхности оболочки. Поскольку температура плавления алюминия гораздо ниже (около 700°С) предполагалось, что на границе металл-стекло должно

Гончарук Владимир Кириллович, доктор химических наук, профессор. E-mail: gon@ich.dvo.ru

Бочарова Анна Альбертовна, кандидат физико-математических наук, доцент. E-mail: bocharova.aa@dvfu.ru

Ратников Александр Александрович, заведующий лабораторией компьютерного моделирования. E-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru

произойти образование переходного диффузионного слоя.

Математическая модель. В процессе формирования цилиндрической оболочки из СМК расплав стекломассы, имеющий температуру свыше 1000°С, остывает до нормальной температуры (20°С). При понижении температуры стекломасса из жидкотекучего состояния переходит в вязко-пластическое, затем в вязко-упругое и, наконец, в твёрдое (хрупкое) состояние. Формирование цилиндрической композитной оболочки происходит под воздействием осесимметричного поля изменения температуры во времени, следовательно, цилиндрическая оболочка будет испытывать осесимметричную деформацию, при этом процесс формирования оболочки происходит настолько медленно, что можно пренебречь силами инерции. Изменения температуры, вызываемые деформированием СМК в процессе остывания, пренебрежимо малы по сравнению с температурой стекломассы. Вследствие этого общая задача формирования цилиндрической оболочки распадается на две независимые задачи: температурную и деформационную.

Деформационная часть задачи формирования цилиндрической оболочки из СМК решается, начиная с температуры стеклования до полного её остывания (20°С), начальными условиями для её решения являются условия полного отсутствия напряжений, перемещений, деформаций и скоростей их изменения в слоях композитной оболочки. Математическая модель формирования цилиндрической оболочки из СМК строится с помощью метода физической дискретизации трёхмерных уравнений механики деформируемого твёрдого тела [8]. Сущность этого метода заключается в том, что каждый слой рассматривается как самостоятельная оболочка постоянной толщины, на которую действуют соседние слои или окружающая среда. Получаемая система обыкновенных дифференциальных уравнений находится в полном соответствии с фундаментальными уравнениями механики сплошных сред, с повышенной точностью отражая физические закономерности деформирования материала в составе оболочки. В первой деформационной задаче все параметры материалов взяты интегрально-усреднёнными по всему диапазону температур, во второй задаче температурный интервал разбивается на 10 равных отрезков. При этом параметры материалов берутся интегральноусредненными по конкретному температурному отрезку. Окончательное решение находится путём суммирования всех решений, найденных на каждом интервале.

Деформирование каждого слоя оболочки рассматривается в местной системе координат при совмещении основных координатных поверхностей со срединными поверхностями слоёв. Основные координатные поверхности являются круговыми цилиндрическими. За их координаты приняты расстояние *s* вдоль образующей и угол φ – в окружном направлении. Третьи координаты *z* отсчитываются по нормали к основным координатным поверхностям в направлении внешней нормали. На рис. 2 в своих локальных системах координат показана условная схема силового взаимодействия слоёв трёхслойной оболочки.

Математическая модель деформирования слоистой цилиндрической оболочки включает уравнения: – равновесия

$$\frac{dN_{11}}{ds} = -\left(\sigma_{31}^+ - \sigma_{31}^-\right)_{31}$$

$$\frac{d^{2}M_{11}}{ds^{2}} - \frac{N_{22}}{R} = -\frac{h}{2}\frac{d}{ds}(\sigma_{31}^{+} + \sigma_{31}^{-}) - (\sigma_{33}^{+} - \sigma_{33}^{-});$$

$$Q_{1} = \frac{dM_{11}}{ds} + \frac{h}{2}(\sigma_{31}^{+} + \sigma_{31}^{-})$$
(1)



Рис. 2. Условная схема силового взаимодействия слоёв цилиндрической оболочки между собой и окружающей средой

- геометрии

$$\varepsilon_{11} = \frac{du}{ds} + z \frac{d\psi_1}{ds}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{w}{R}, \quad (2)$$

условий сопряжения слоёв

$$u^{(1)} + \frac{h_1}{2} \psi_1^{(1)} = u^{(2)} - \frac{h_2}{2} \psi_1^{(2)};$$

$$u^{(2)} + \frac{h_2}{2} \psi_1^{(2)} = u^{(3)} - \frac{h_3}{2} \psi_1^{(3)};$$

$$w^{(1)} + \Delta w_1^+ = w^{(2)} + \Delta w_2^-;$$

(3)

$$w^{(*)} + \Delta w_2^* = w^{(*)} + \Delta w_3, \qquad (4)$$

– граничных условий

$$s=0, L: Q_{1}^{(i)} = 0; N_{11}^{(i)} = 0; M_{11}^{(i)} = 0, \qquad (5)$$

где N₁₁ и N₂₂ – удельные тангенциальные силы, отнесенные к единице длины; М11 – удельный изгибающий момент, отнесенный к единице длины; $\sigma_{_{31}}$ и $\sigma_{_{33}}$ – соответственно касательное и нормальное напряжения, действующие на нижней поверхности расчетного слоя; $\sigma_{_{31}}^{_+}$ и $\sigma_{_{33}}^{_+}$ – соответственно касательное и нормальное напряжения, действующие на верхней поверхности расчётного слоя; Q₁ – удельная поперечная сила, отнесенная к единице длины; и и w – перемещения срединной поверхности вдоль осей s и z соответственно, зависящие только от s; ψ_1 – угол поворота нормали к срединной поверхности; ε_{11} – нормальные деформации в направлении образующей цилиндрического слоя, ε_{22} – нормальные деформации в окружном направлении, R – радиус срединной поверхности, h – толщина слоя, L – длина половины оболочки, Δw – дополнительные прогибы поверхностей сопряжения слоёв, вызванные стеснённой частью поперечных деформаций:

$$\Delta w_{i}^{\pm} = \frac{1}{E_{i}} \int_{0}^{\pm h_{i}/2} \sigma_{33}^{(i)} dz$$

Фундаментальные уравнения дополняются уравнениями закона Гука. Силовые условия сопряжения слоёв данной трёхслойной оболочки получаются на основании третьего закона Ньютона, согласно которому силы взаимодействия одной области на другую равны по величине и противоположны по направлению.

Процесс деформирования является симметричным относительно среднего поперечного сечения оболочки и осесимметричным относительно оси симметрии, поэтому рассматривается только половина длины оболочки. При этом перемещения, деформации и напряжения оказываются независимыми от координаты φ . Удельные тангенциальные силы и удельный изгибающий момент:

$$Q_{1} = \int_{h} \left(1 + \frac{z}{R}\right) \sigma_{13} dz = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \gamma_{1};$$

$$N_{11} = \int_{h} \left(1 + \frac{z}{R}\right) \sigma_{11} dz = ;$$

$$N_{12} = \int_{h} \frac{Eh}{1-\nu^{2}} \left[\frac{du}{ds} + \nu \frac{w}{R} + \frac{h^{2}}{12R} \frac{d\psi_{1}}{ds}\right] - \sigma_{t}h$$

$$N_{22} = \int_{h} \sigma_{22} dz = \frac{Eh}{1-\nu^{2}} \left[\frac{w}{R} + \nu \frac{du}{ds}\right] - \sigma_{t}h;$$

$$M_{11} = \int_{h} \left(1 + \frac{z}{R}\right) z \sigma_{11} dz = , \qquad 6)$$

$$= \frac{Eh^{3}}{12(1-\nu^{2})} \left[\frac{d\psi_{1}}{ds} + \frac{1}{R} \frac{du}{ds}\right] - \sigma_{t} \frac{h^{3}}{12R}$$

где, σ_t – температурная составляющая напряжений: $\sigma_{t} = \frac{E}{1 - v} \alpha^{+} \Delta T \cdot$

Уравнения (1) – (6) образуют замкнутую систему уравнений, которая решается при условиях отсутствия внешних сил и условиях сопряжения слоёв, не допускающих смещения их относительно друг друга. Исключив из уравнений равновесия (1) удельные силы N₂₂, используя условиям самоуравновешивания внутренних сил в поперечных сечениях оболочки:

$$\sum_{i=1}^{3} R_{i} N_{11}^{(i)} = 0; \quad \sum_{i=1}^{3} R_{i} Q_{1}^{(i)} = 0; \quad \sum_{i=1}^{3} N_{22}^{(i)} = 0$$

получим:

$$\tau_{31}^{-} = R_{\tau} \tau_{31}^{+}; \ \tau_{33}^{-} = R_{\tau} \tau_{33}^{+}, \text{ где } R_{\tau} = \frac{R_{3} - R_{2}}{R_{1} - R_{2}}$$
(8)

Удельные сила N₁₁ и момент M₁₁ для каждого слоя выражаются из проинтегрированных уравнений равновесия через напряжения на стыках слоев. Чтобы выразить удельную силу N₂₂ через напряжения на стыках слоёв и исключить её из рассмотрения, необходимо алгебраически решить систему уравнений, в которую входят продифференцированные условия сопряжения слоёв (3), записанные в деформациях ε_{11} , и последнее уравнение самоуравновешивания цилиндрической оболочки (6). В общем виде решение записывается следующим образом:

$$N_{22}^{(i)} = a_i + b_i \int \tau_{31}^+ ds$$

где a_i и b_i – константы, выраженные через размеры оболочки, параметры материалов и константы интегрирования уравнений равновесия $C_{(\iota)}^{(i)}$:

(9)

$$N_{11}^{(i)} = \int \left(\sigma_{31}^{-(i)} - \sigma_{31}^{+(i)}\right) ds + c_{1}^{(i)};$$
$$Q_{1}^{(i)} = \int \left(\frac{N_{22}^{(i)}}{R_{i}} + \sigma_{33}^{-(i)} - \sigma_{33}^{+(i)}\right) ds + c_{2}^{(i)};$$

$$M_{11}^{(i)} = \int \left(\int \left(\frac{N_{22}^{(i)}}{R_i} + \sigma_{33}^{-(i)} - \sigma_{33}^{+(i)} \right) ds \right) ds - \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{+(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds + \frac{1}{2} \int \left(\sigma_{13}^{-(i)} + \sigma_{13}^{-(i)} \right) ds$$

где $N_{22}^{(i)}$ определяются формулой (8). Из уравнений (6) u, w и ψ_1 выражаются через N_{11} , *Q*₁, *M*₁₁. Затем они подставляются в условия сопряжения слоёв (3) и (4) используя выражения (9) и (10). Получается система из четырёх дифференциальноинтегральных уравнений относительно функций τ_{13}^{+} и τ_{33}^{\pm} CONCERNING DOMOS

$$\tau_{1}^{\perp} = \iiint \tau_{13}^{\perp} \, ds \, ds \, ds \, ; \, \tau_{3}^{\perp} = \iint \tau_{33}^{\perp} \, ds \, ds \, . \tag{11}$$

Полученная система легко сводится к двум уравнениям. Для этого уравнения (3) решаются алгебраически относительно функций au_3^{\pm} , их выражения подставляются в (4):

$$\begin{cases} B_{1}^{1} \frac{d^{4} \tau_{1}^{+}}{ds^{4}} + B_{2}^{1} \frac{d^{4} \tau_{1}^{-}}{ds^{4}} + B_{3}^{1} \frac{d^{2} \tau_{1}^{+}}{ds^{2}} + B_{4}^{1} \frac{d^{2} \tau_{1}^{-}}{ds^{2}} + \\ + B_{5}^{1} \tau_{1}^{+} + B_{6}^{1} \tau_{1}^{-} = B_{7}^{1} s^{2} + B_{8}^{1} s + B_{9}^{1}; \\ B_{1}^{2} \frac{d^{4} \tau_{1}^{+}}{ds^{4}} + B_{2}^{2} \frac{d^{4} \tau_{1}^{-}}{ds^{4}} + B_{3}^{2} \frac{d^{2} \tau_{1}^{+}}{ds^{2}} + B_{4}^{2} \frac{d^{2} \tau_{1}^{-}}{ds^{2}} + \\ + B_{5}^{2} \tau_{1}^{+} + B_{6}^{2} \tau_{1}^{-} = B_{7}^{2} s^{2} + B_{8}^{2} s + B_{9}^{2}. \end{cases}$$
(12)

где B^{*j*}_{*i*} - константы, выраженные через размеры рассматриваемой оболочки и параметры материалов. Решение системы (12) подставляется в уравнения (10) для удовлетворения граничным условиям (5).

Результаты и обсуждение. В качестве примера рассмотрим цилиндрическую оболочку, состоящую из наружных стальных обшивок и внутреннего стеклянного слоя. Геометрические размеры оболочки: радиус срединой поверхности стеклянного слоя R₂=1 м, его толщина *h*₂=0,1 м; радиус срединной поверхности внутреннего металлического слоя R₁=0,9495 м, его толщина *h*₁=0.001 м; радиус срединной поверхности внешнего металлического слоя R₃=1,055 м, его толщина h₃=0,01 м; длина половины оболочки L=4 м. Физикомеханические и теплофизические параметры материалов взяты интегрально усреднёнными в диапазоне остывания от 550 до 20°С: Е₁=Е₃=1,851•10⁶ МРа; E₂=0,678•10⁶ MPa; $\alpha_1 = \alpha_3 = 12,635 \cdot 10^{-6}$ °C; $\alpha_2 = 8,5 \cdot 10^{-6}$ °C; v1=v3=0,3; v2=0,22.



Рис. 3. Распределение касательных напряжений по длине оболочки: 1 - решение при интегральном осреднении по всему диапазону температур; 2 – решение при пошаговом интегральном осреднении

Графики скалывающих и отрывных напряжений, действующих на границе сопряжения металлического слоя со стеклом, представлены на рис. 3 и 4. Напряжения, действующие на границе сопряжения внутреннего металлического слоя со стеклом, определяются по формулам (7).



Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по длине оболочки: 1 – решение при интегральном осреднении по всему диапазону температур; 2 – решение при пошаговом интегральном осреднении

Поскольку остаточные напряжения на стыках слоёв не превосходят разрушающих, можно сделать **вывод** о перспективности применения создаваемых методом центрифугирования цилиндрических оболочек из СМК в качестве прочных корпусов глубоководных аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор прикладный научных исследований (проекma) – RFMEFI57814X0024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Пикуль, В.В. К созданию композиционного наноматериала на базе стекла // Перспективные материалы. 2008. № 3. С. 78-83.
- Пикуль, В.В. Композиционный наноматериал на основе стекла – стеклометаллокомпозит / В.В. Пикуль, В.К. Гончарук // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 6. С. 5-9.
- Ратников, А.А. Основы технологического режима изготовления оболочек вращения из стелометаллокомпозита // Сб. трудов междун. науч.-практ. конф. «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии (XVIII научные чтения)». – Белгород, 2007. С. 210-213.
- Bocharova, A.A. Asymptotic Model of Free Convection Flow on a Vertical Surface in Porous Media with Newtonian Heating / A.A. Bocharova, I.V. Plaksina, A.A. Obushnyy // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. P. 469-475.
- Fu, X.L. High temperature deformation behavior of Mg67Zn28Ca5 metallic glass and its composites / X.L. Fu, M.J. Tan, Y. Chen et al. // Materials Science and Engineering: A, In Press, Accepted Manuscript, Available online. 24 October 2014.
- Salvo, M. Glasses and glass-ceramics as brazing materials for high-temperature applications / M. Salvo, V. Casalegno, S. Rizzo et al. // Advances in Brazing. 2013. P. 525-544.
- Alias, R. 24 Multilayer glass–ceramic composites for microelectronics: processing and properties // Advances in Ceramic Matrix Composites. 2014. P. 587-610.
- Luo, Y. Joining mechanism and modeling of vacuum-free semi-solid stirring joining / Y. Luo, X. Huibin, L. Quanxiang et al. // Applied Mathematical Modeling. 2014. P. 316-321.

APPLICATION THE CENTRIFUGATION METHOD FOR PRODUCTION THE SUBMERSIBLES CASES FROM NEW CONSTRUCTIONAL MATERIAL – GLASS-METAL COMPOSITE

© 2016 V.K. Goncharuk, A.A. Bocharova, A.A. Ratnikov

Far Eastern Federal University, Vladivostok

In work the description of installation for production the covers from glass-metal composite is submitted, the received approach to formation of a glass layer without superficial microcracks has no analogs in world practice of elimination the superficial microcracks in glass. On the basis of physical sampling method the scheme of calculation for determination the residual stresses on joints of layers is constructed.

Key words: glass-metal composite, cylindrical cover, case, constructional material

Vladimir Goncharuk, Doctor of Chemistry, Professor. E-mail: gon@ich.dvo.ru

Anna Bocharova, Candidate of Physics and Mathematics,

Associate Professor. E-mail: bocharova.aa@dvfu.ru Alexander Ratnikov, Chief of the Computer Modeling Laboratory. E-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru