

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ БАГАТОШАРОВОГО ОСКЛІННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Сметанкіна Н.В., д.т.н., проф.

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

Бредихін В.В., к.т.н., доц.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка*

Запропоновано метод розрахунку міцності багатошарового оскління транспортних засобів при теплових навантаженнях, які виникають внаслідок техногенних аварій. Багатошарове оскління розглядається як багатошарова пластина, яка зібрана з ізотропних шарів сталі товщини. Модель оскління базується на уточненій теорії багатошарових пластин. Вона враховує деформації поперечного зсуву в кожному шарі. Задача розв'язується на основі методу занурення та зводиться до інтегрування системи інтегродиференціальних сингулярних рівнянь. Метод базується на прийомі занурення складної області в область канонічної форми. Як допоміжна обирається шарнірно оперта прямокутна пластина. Тоді розв'язок вихідної задачі можна записати у вигляді розвинень у тригонометричні ряди. Щоб реалізувати задані граничні умови, до допоміжної пластини прикладаються розподілені додаткові навантаження. З умови задоволення вихідних граничних умов формується система інтегральних рівнянь для визначення невідомих додаткових навантажень. Система розв'язується шляхом розвинення шуканих функцій у тригонометричні ряди в допоміжній області та d ряд уздовж контуру вихідної пластини.

Температурні впливи одержано в результаті розв'язання задачі теплопровідності для багатошарової пластини. На бічній поверхні пластини підтримується нульова температура. На зовнішніх поверхнях відбувається конвективний теплообмін, а на границях контакту шарів розташовані плівкові джерела тепла. Розподіл температури вздовж товщини кожного шару описано за допомогою ортонормованих поліномів Лежандра. Задача зводиться до інтегрування системи диференціальних рівнянь модифікованим методом Тейлора.

Проведено чисельне дослідження тришарового оскління деяких типів спецтехніки щодо їх відповідності вимогам безпеки та надійності. Запропонований підхід може бути використаний при проектуванні безпечного багатошарового оскління різних транспортних засобів в умовах експлуатаційних та аварійних термосилових навантажень.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Забезпечення ефективної й безпечної експлуатації спецтехніки МНС є однією з найважливіших проблем

при ліквідації наслідків техногенних аварій. Одна із складових цієї проблеми – забезпечення міцності оскління кабін основних та спеціальних пожежних автомобілів, оскільки воно є однією з найбільш уразливих частин техніки.

Характерними рисами експлуатації спецтехніки МНС є робота поблизу пожеж та вибухонебезпечних об'єктів, що може привести до дії на елементи конструкцій значних силових та температурних впливів. Особливо небезпечною є робота поруч із вибухонебезпечними об'єктами, оскільки під час вибуху на спецтехніку діють короточасні навантаження великої інтенсивності [1].

Пожежні автомобілі призначені для доставки особового складу до місця виклику, гасіння пожеж, проведення рятувальних робіт, а також для подачі до місця пожежі вогнегасних речовин [2]. Як правило, пожежні автомобілі виробляються на базі шасі існуючих вантажівок (КАМАЗ, ЗІЛ, МАЗ, КрАЗ).

До основних груп спецтехніки належать армійські автомобілі багатоцільового призначення, спеціальні колісні шасі і гусеничні транспортери-тягачі.

По площі оскління займає значну поверхню кабін 1,8-2,6 м². На багатоцільових автомобілях, як правило, присутні по два великих вітрових вікна, розділених центральною стійкою віконного прорізу, від одного до трьох вікон задньої панелі, два опускні стекла вікон дверей і квартирки дверей.

Деякі моделі гусеничних транспортерів-тягачів мають конструкцію оскління аналогічну багатоцільовим автомобілям, але з меншими розмірами вікон і більш твердими прорізами за рахунок збільшеної товщини обшивань корпусу кабіни.

Температурні навантаження, за яких проводяться випробування скла, регламентуються різними нормативними документами [3–5].

Аналіз публікацій за темою дослідження. Практична робота зі створення захисного оскління транспортних засобів привела до створення ГОСТ Р 51136-2008 [3]. Стандарт на безпечні багатошарові й загартовані стекла для засобів наземного транспорту регламентується ГОСТ 5727-88 [4]. Він поширюється на склопакети для наземного транспорту, призначені для безпечного оскління автомобілів, автобусів, тролейбусів, вагонів поїздів, трамваїв, метрополітену, тракторів, сільськогосподарських, будівельних і дорожньо-будівельних машин. При цьому методи дослідження міцності оскління засновані на емпіричних даних і спрощених моделях [5].

Таким чином, розробка методів розрахунку термопружності оскління спецтехніки МНС при впливі теплових навантажень при гасінні пожеж є актуальною проблемою.

Отже, **невирішеною проблемою** є розробка ефективних методів розрахунку безпечного багатошарового оскління при нестационарних теплових навантаженнях.

Мета статті. Метою роботи є розробка методів розрахунку теплового та термопружного стану багатошарового оскління спецтехніки при впливі нестационарних температурних полів.

Метод розрахунку температурних полів у шарах багатошарового оскління. Найчастіше в кабінах використовуються плоскі стекла. Оскління кабін виконується із загартованих одношарових стекол (сталініту) чи

тришарових (триплекса). Закріплення вітрових стекол і стекол задньої панелі в прорізах здійснюється за допомогою гумового ущільнювача, що фіксується по периметру закладення замком із полімерного матеріалу чи гуми, що дозволяє розглядати елементи оскління як шарнірно оперті пластини.

Багатошарове оскління спецтехніки МНС розглядається як багатошарова пластина з неканонічною формою плану, яка зібрана із I шарів постійної товщини $h_i (i = \overline{1, I})$ (рис. 1). Пластина віднесена до декартової системи координат, що зв'язана з зовнішньою поверхнею першого шару.

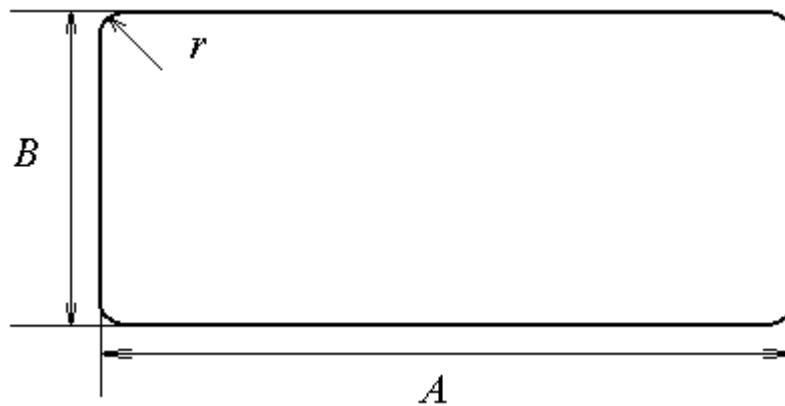


Рис. 1 – Елемент оскління

Координатна площина зв'язана з зовнішньою поверхнею першого шару. У цій площині пластина займає область Ω^* , обмежену контуром L

$$L: x_L = x(s), y_L = y(s),$$

де: s – поточна довжина дуги.

Верхня і нижня поверхні пластини позначені як Ω_0 і Ω_I , бічна поверхня – Ω_L , причому $\Omega = \Omega_0$, $\Omega_L = \sum_{i=1}^I \Omega_L^i$, $i = \overline{1, I}$. На поверхнях пластини відбувається конвективний теплообмін. Пластина містить плівкові джерела тепла $q_\Omega^i = q_\Omega^i(x, y, \tau)$, які займають область Ω_q^i .

Рівняння теплопровідності і граничні умови на зовнішніх поверхнях багатошарової пластини виходять з варіаційного рівняння теплового балансу [6]

$$\frac{\partial T^i}{\partial \tau} = \nu_i \Delta T^i + \frac{q^i}{c_i \rho_i}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

$$-\chi_1^1 k_1 \frac{\partial T^1}{\partial z} + \chi_2^1 H_1 (T^1 - T_e) = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega_0, \quad (2)$$

$$\chi_1^I k_I \frac{\partial T^I}{\partial z} + \chi_2^I H_I (T^I - T_H) = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega_I. \quad (3)$$

де: $T^i = T^i(x, y, z, \tau)$ – температура; τ – час; $\nu_i = k_i / (\rho_i c_i)$ – коефіцієнт температуропровідності i -го шару; k_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару; ρ_i – щільність матеріалу шару; c_i – теплоємність шару; H_1 і H_I – коефіцієнти конвективного теплообміну верхній і нижній поверхнях пластини, відповідно; T_6 і T_H – температура середовища на границі з бічною, верхньою і нижньою поверхнями; $q^i = q^i(x, y, z, \tau)$ – інтенсивність i -го внутрішнього джерела тепла.

Коефіцієнти χ_1^1 , χ_2^1 , χ_1^I і χ_2^I дозволяють моделювати задані граничні умови.

На границі контакту шарів $z = \delta_i$ $\left(\delta_i = \sum_{j=1}^i h_j, i = \overline{1, I-1} \right)$ виконуються умови

$$\begin{aligned} k_i \frac{\partial T^i}{\partial z} - k_{i+1} \frac{\partial T^{i+1}}{\partial z} - q_\Omega^i &= 0, \\ T^i &= T^{i+1}, \quad i = \overline{1, I-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

де: $q_\Omega^i = q_\Omega^i(x, y, \tau)$ – інтенсивність i -го плівкового джерела тепла, розташованого на границі контакту сусідніх шарів.

Для того щоб тривимірну задачу теплопровідності звести до двовірної задачі, температура в шарах T^i і на бічній поверхні T_L^i , а також питомі потужності q^i внутрішніх джерел тепла подаються у вигляді розвинень у ряди по поліномах Лежандра [7]

$$T^i(x, y, z, \tau) = \sum_{r=0}^{\infty} T_r^i(x, y, \tau) f_r^i(z), \quad (x, y) \in \Omega, \quad z \in [\delta_{i-1}, \delta_i], \quad (5)$$

$$T_L^i(x, y, z, \tau) = \sum_{r=0}^{\infty} T_{Lr}^i(x, y, \tau) f_r^i(z), \quad (x, y) \in L, \quad (6)$$

$$q^i(x, y, z, \tau) = \sum_{r=0}^{\infty} q_r^i(x, y, \tau) f_r^i(z), \quad (x, y) \in \Omega_L^i, \quad (7)$$

де

$$T_r^i = \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} T^i f_r^i dz, \quad T_{Lr}^i = \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} T_L^i f_r^i dz, \quad q_r^i = \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} q^i f_r^i dz;$$

$f_r^i(z)$ – поліном Лежандра степеня r , $r = \overline{1, r^*}$; r^* – кількість членів ряду, утримуваних у розвиненнях.

З урахуванням розкладання (5) умови (2)–(3) утворюють систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$[\mathbf{A}] \bar{\mathbf{T}} = [\mathbf{B}] \tilde{\mathbf{T}} + \mathbf{D}, \quad (8)$$

Система (8) дозволяє виразити коефіцієнти T_1^i і T_2^i через коефіцієнти T_0^i

$$\bar{\mathbf{T}} = [\mathbf{A}]^{-1}([\mathbf{B}] \tilde{\mathbf{T}} + \mathbf{D}). \quad (9)$$

Звідси

$$T_1^i = \sum_{j=1}^l \xi_j^{2i-1} T_0^j + \psi^{2i-1}, \quad T_2^i = \sum_{j=1}^l \xi_j^{2i} T_0^j + \psi^{2i}, \quad (10)$$

де: ξ_j^{2i-1} , ξ_j^{2i} , ψ^{2i-1} і ψ^{2i} – константи, отримані в результаті чисельних перетворень (9);

$$[\xi] = [\mathbf{A}]^{-1}[\mathbf{B}], \quad \psi = [\mathbf{A}]^{-1}\mathbf{D}.$$

З урахуванням рівностей (10) розподіл температури в шарах пластини (5) можна записати у вигляді

$$T^i(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^l [(\delta_{ij} f_0^i + \xi_j^{2i-1} f_1^i + \xi_j^{2i} f_2^i) T_0^j] + (\psi^{2i-1} f_1^i + \psi^{2i} f_2^i). \quad (11)$$

Метод розв'язання системи (1)–(4) полягає у наступному [6]. Вихідна багат шарова пластина довільної форми в плані занурюється в допоміжну багат шарову прямокутну охоплюючу пластину з нульовими умовами на контурі і з тією ж композицією шарів. Щоб забезпечити виконання реальних граничних умов, до допоміжної пластини по сліду границі L додаються додаткові компенсуючі джерела, які входять у рівняння теплопровідності (1) в інтегральному вигляді. Задоволення граничним умовам на сліді контуру L приводить до системи інтегральних рівнянь для визначення розподілів компенсуючих джерел. Далі функції температури (11) і внутрішніх джерел (7) розвиваються в тригонометричні ряди по функціях, що задовольняють граничним умовам прямокутної пластини, а також функції температури (6), що входять у граничні умови вихідної пластини, розкладаються в ряд уздовж сліду контуру L [6, 8]. Після визначення інтенсивностей компенсуючих джерел, обчислюються значення температур у шарах пластини. Далі розв'язується задача термопружності багат шарових пластин під дією отриманих температурних полів.

2. Метод розрахунку термопружного стану багат шарового оскління спецтехніки МНС при температурних впливах. Також розглядається багат шарова пластина, яка зібрана із шарів постійної товщини та віднесена до декартової системи координат, що зв'язана з зовнішньою поверхнею першого

шару (див. рис. 1). На пластину діє розподілене навантаження $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}(x, y)$, яке прикладене по площадці $\Omega_q \subset \Omega$. Поведінка пластини описується в рамках уточненої теорії Э.І. Григолюка-П.П. Чулкова [6].

У рамках обраної теорії вважаємо, у межах кожного шару враховуються деформації поперечного зсуву й інерції обертання нормального елемента. Контакт між шарами виключає їх розшаровування і взаємне проковзування. Для пакета шарів справедлива гіпотеза ламаної лінії. З урахуванням цих кінематичних гіпотез переміщення точки i -го шару мають вигляд

$$u^i = u + \sum_{j=1}^{i-1} h_j \psi_x^j + (z - \delta_{i-1}) \psi_x^i, \quad v^i = v + \sum_{j=1}^{i-1} h_j \psi_y^j + (z - \delta_{i-1}) \psi_y^i,$$

$$w^i = w, \quad \delta_i = \sum_{j=1}^i h_j, \quad \delta_{i-1} \leq z \leq \delta_i, \quad i = \overline{1, I},$$

де: $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$, $w = w(x, y, t)$ – переміщення точки координатної площини в напрямку координатних осей; $\psi_x^i = \psi_x^i(x, y, t)$, $\psi_y^i = \psi_y^i(x, y, t)$ – кути повороту нормального елемента в i -му шарі навколо осей Ox і Oy ; h_i – товщина i -го шару; I – число шарів.

Деформації шарів визначаються відповідно до формул Коші. Напруження і деформації в i -му шарі зв'язані законом Гука.

Рівняння рівноваги багатошарової пластини, а також відповідні граничні умови одержані на основі варіаційного принципу Лагранжа

$$\delta\Pi - \delta F = 0.$$

Система рівнянь рівноваги має вигляд

$$\sum_{i=1}^I (N_{x,x}^i + N_{yx,y}^i - N_{T,x}^i) + q_1 = 0, \quad \sum_{i=1}^I (N_{xy,x}^i + N_{y,y}^i - N_{T,y}^i) + q_2 = 0,$$

$$\sum_{i=1}^I (Q_{x,x}^i + Q_{y,y}^i) + q_3 = 0,$$

$$h_i \sum_{j=i}^{I-1} (N_{x,x}^{j+1} + N_{yx,y}^{j+1} - N_{T,x}^{j+1}) + M_{x,x}^i + M_{yx,y}^i - Q_x^i - M_{T,x}^i + q_{3+i} = 0,$$

$$h_i \sum_{j=i}^{I-1} (N_{y,y}^{j+1} + N_{xy,x}^{j+1} - N_{T,y}^{j+1}) + M_{y,y}^i + M_{xy,x}^i - Q_y^i - M_{T,y}^i + q_{3+I+i} = 0. \quad (12)$$

Граничні умови на границі L записуються в такий спосіб:

$$\varsigma_{11} N_n + \varsigma_{21} u_n = 0, \quad \varsigma_{12} N_s + \varsigma_{22} u_s = 0, \quad \varsigma_{13} Q_n + \varsigma_{23} w = 0, \quad \varsigma_{13+i} \tilde{M}_n^i + \varsigma_{23+i} \psi_n^i = 0,$$

$$\varsigma_{13+I+i} M_s^i + \varsigma_{23+I+i} \psi_s^i = 0, \quad i = \overline{1, I}, \quad x, y \in L, \quad (13)$$

де: u_n, u_s – переміщення точок контуру координатної площини в напрямку нормалі і дотичної до границі L , відповідно; ψ_n^i, ψ_s^i – кути повороту нормального елемента в i -му шарі щодо дотичної і нормалі до границі L , відповідно;

Коефіцієнти ς_{lk} ($k=1, 2I+3, l=1, 2$) дозволяють моделювати конкретні граничні умови на границі L . Наприклад, у випадку шарнірного опирання

$$\begin{aligned} \varsigma_{11} = \varsigma_{22} = \varsigma_{23} = \varsigma_{13+i} = \varsigma_{23+I+i} = 1, \\ \varsigma_{21} = \varsigma_{12} = \varsigma_{13} = \varsigma_{23+i} = \varsigma_{13+I+i} = 0, \quad i = \overline{1, I}. \end{aligned}$$

Система рівнянь (12) може бути подана в переміщеннях у наступній формі:

$$[\Lambda]U = Q^T - Q. \quad (14)$$

Тут U – вектор переміщень;

$$\begin{aligned} q_1^T = \sum_{i=1}^I N_{T,x}^i, \quad q_2^T = \sum_{i=1}^I N_{T,y}^i, \quad q_3^T = 0, \\ q_{3+i}^T = h_i \sum_{j=i}^{I-1} N_{T,x}^{j+1} + M_{T,x}^i, \quad q_{3+I+i}^T = h_i \sum_{j=i}^{I-1} N_{T,y}^{j+1} + M_{T,y}^i. \end{aligned}$$

Розв'язання поставленої задачі (12)–(14) є аналогічним розв'язанню задачі теплопровідності. Вихідна пластина занурюється в допоміжну прямокутну шарнірно оперту пластину. Таким чином, задача про деформування заданої пластини Ω^* під дією силового Q і теплового Q^T навантаження зводиться до задачі про деформування допоміжної пластини під дією навантажень Q і Q^T , а також компенсуючих зусиль і моментів [6]. Далі переміщення U , задані і компенсуючі навантаження, які входять у систему (12)–(14), розвиваються в тригонометричні ряди по функціях, що задовольняють умови шарнірного опирання прямокутної пластини.

Аналіз результатів чисельних досліджень. Температура, яка виникає при лісових пожежах дорівнює 100–930 °С [9]. При пожежах на нафтобазах, підприємствах хімічної та нафтохімічної промисловості температура підвищується до 2000 °С [10].

Встановлено, що температура руйнування багат шарового оскління становить 350 °С. Якщо температура вище, то треба застосовувати спеціальні пожежні танки або багатоцільові легкі броньовані тягачи, у яких склоблоки обладнані броньовими кришками. При цьому спостереження за дорогою механіком-водієм ведеться через оглядові пристрої.

Розрахунок температурних полів проведено на прикладі вітрових стекол деяких типів спецтехніки (табл. 1).

Таблиця 1 – Геометричні характеристики стекол

Тип спецтехніки	АхВ, мм
КамАЗ - 5320	1024х662
Урал - 432	788х384
КрАЗ - 260	855х563

Розглянуті тришарові композиції h_1^* (2) h_3^* . Шари мають такі теплофізичні характеристики: $k_i = 1,61 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, $c_i = 750 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$, $\rho_i = 2500 \text{ кг/м}^3$ ($i = 1,3$), $k_i = 0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, $c_i = 1500 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$, $\rho_i = 1200 \text{ кг/м}^3$ ($i = 2$).

Коефіцієнти конвективного теплообміну та температура зовнішнього середовища: $H_1 = 80 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$, $H_3 = 25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$, $T_s = 350 \text{ °C}$, $T_e = 20 \text{ °C}$.

Механічні характеристики шарів є такими: $E_i = 6,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\nu_i = 0,22$, $\alpha_T^i = 9 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ ($i = 1,3$); $E_i = 2,8 \cdot 10^2 \text{ МПа}$, $\nu_i = 0,38$, $\alpha_T^i = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$ ($i = 2$).

Результати розрахунку температури на зовнішніх поверхнях оскління та найбільші значення температурних напружень подані у табл. 2.

Таблиця 2 – Значення температури та напружень у шарах оскління

Тип спец-техніки	Композиція h_1^* (2) h_3^* , мм	Температура на поверхнях оскління, °C	Найбільші напруження у шарах, МПа
КамАЗ-5320	5 (2) 5	296/190	145
Урал-432	3 (2) 3	294/198	166
КрАЗ-260	3 (2) 5	295/196	144

З табл. 2 видно, що температура у склі для всіх типів спецтехніки при розглянутих умовах не перевищує температури руйнування. При цьому максимальні значення напружень перевищують допустимі значення. Тому під час гасіння пожеж необхідно встановлювати безпечну відстань, за якої кожен тип спецтехніки в цілому витримає теплове навантаження.

Висновки й перспективи подальших досліджень. На основі уточненої теорії першого порядку розроблено аналітико-чисельний метод розрахунку на міцність оскління спецтехніки МНС при впливі нестационарних теплових навантажень. Досліджено температури та напруження у шарах багатошарового оскління при підвищених температурних навантаженнях. Встановлено, що під час гасіння пожеж є необхідність встановлювати безпечну відстань, за якої оскління та інші вузли машин спецтехніки витримують температурні навантаження. Запропонований підхід може бути використаний при проектуванні багатошарового оскління спецтехніки МНС при екстремальних навантаженнях, що виникають під час техногенних аварій.

Список використаних джерел

1. Бруль С.Т. К вопросу о моделировании воздействия ударной волны на корпус боевой машины / С.Т. Бруль, А.Ю. Васильев //Вісник НТУ «ХПІ» Машиноведение и САПР – Харків:НТУ «ХПІ», 2005. – №53. – С.29-34
2. ГОСТ Р 53247-2009 Техника пожарная. Пожарные автомобили.

- Классификация, типы и обозначения. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. N 18-ст. – 5 с.
3. ГОСТ Р 51136-2008. Стекла защитные многослойные. Общие технические условия. Принято и введено в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2008 г. № 222-ст – 15 с.
 4. ГОСТ 5727–88. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. Принято и введено в действие Постановлением Госстандарта России от 27.08.2001 N 353-ст – 5 с.
 5. Голяков В.И. Метод расчета взрывозащитного остекления / В.И. Голяков, А.А. Дайлов, В.А. Кишкин // Системы безопасности.– 2004.– № 4.– С. 26-27.
 6. Сметанкина Н.В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек: монография. / Н.В. Сметанкина. – Харьков: Міськдрук, 2011.– 376 с.
 7. Сметанкіна Н.В. Термопружне деформування шаруватих оболонок складної форми / Н.В. Сметанкіна // Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. – 2017.– № 1.– С. 312-319.
 8. Smetankina N.V. Dynamic response of an elliptic plate to impact loading. Theory and experiment / N.V. Smetankina, A.N. Shupikov, S.Yu. Sotrikhin, V.G. Yareschenko // International Journal of Impact Engineering.– 2007.– Vol. 34, N 2.– P. 264-276.
 9. Валендик Э.Н. Влияние пожаров на устойчивость хвойных пород / Э.Н. Валендик, А.И. Сухинин, А.И. Косов. – Красноярск , 2006. – 96 с.
 10. Шебеко Ю.Н. Обеспечение пожарной безопасности резервуарного парка хранения нефтепродуктов, расположенного вблизи жилых и общественных зданий / Ю.Н. Шебеко, И.А. Болодьян, Д.М. Гордиенко, Ю.И. Дешевых // Пожарная безопасность.– 2009.– № 2.– С. 33–41.

Аннотация

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Сметанкина Н.В., Бредихин В.В.

Предложен метод расчета прочности многослойного остекления транспортных средств при тепловых нагрузках, которые возникают в результате техногенных аварий. Многослойное остекление рассматривается как многослойная пластина, которая собрана из изотропных слоев постоянной толщины. Модель остекления базируется на уточненной теории многослойных пластин. Она учитывает деформации поперечного сдвига в каждом слое. Задача решается на основе метода погружения и сводится к интегрированию системы интегро-дифференциальных сингулярных уравнений. Метод основан на приеме погружения сложной области в область канонической формы. В качестве вспомогательной выбирается шарнирно опертая прямоугольная пластина. Тогда решение исходной задачи можно записать в виде разложений в тригонометрические ряды. Чтобы реализовать заданные граничные условия, к вспомогательной пластине прикладываются распределенные дополнительные нагрузки. Из условия удовлетворения исходным граничным

условиям формируется система интегральных уравнений для определения неизвестных дополнительных нагрузок. Система решается путем разложения искомых функций в тригонометрические ряды во вспомогательной области и в ряд вдоль контура исходной пластины.

Температурные воздействия получены в результате решения задачи теплопроводности для многослойной пластины. На боковой поверхности пластины поддерживается нулевая температура. На внешних поверхностях происходит конвективный теплообмен, а на границах контакта слоев расположены пленочные источники тепла. Распределение температуры вдоль толщины каждого слоя описано с помощью ортонормированных полиномов Лежандра. Задача сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений модифицированным методом Тейлора.

Проведено численное исследование трехслойного остекления некоторых типов спецтехники на их соответствие требованиям безопасности и надежности. Предложенный подход может быть использован при проектировании безопасного многослойного остекления различных транспортных средств в условиях эксплуатационных и аварийных термосиловых нагрузок.

Abstract

CALCULATION OF MULTILAYER GLAZING OF SPECIAL EQUIPMENT AT NON-STATIONARY THERMAL LOADS

Smetankina N.V., Bredikhin V.V.

The method for calculation of strength of a multilayer glazing of vehicles at thermal loads that arise as a result of man-made accidents is proposed. Multilayer glazing is considered as a multilayer plate which is assembled from isotropic layers of constant thickness. The glazing model is based on the refined theory of multilayer plates. It takes into account the deformation of the transverse shear in each layer. The problem is solved on the basis of an immersion method and is reduced to integration of the system of integral-differential singular equations. The method is based on immersion of a complex domain into a canonical form. As an auxiliary, a simply supported rectangular plate is selected. Then the solution of the original problem can be written in the form of expansions into trigonometric series. To implement the specified boundary conditions, distributed additional loads are applied to the auxiliary plate. From the condition of satisfaction of the given boundary conditions, a system of integral equations is formed for the determination of unknown additional loads. The system is solved by developing the sought-for functions into the trigonometric series in the auxiliary domain and in a row along the contour of the given plate.

Temperature effects are obtained by solving the heat conduction problem for a multilayer plate. The temperature on the side surface of the plate is zero. Convective heat transfer occurs on outer surfaces of the plate; on layers' interfaces film heat sources are arranged. Distribution of temperature along width each layer is presented by means of the Legendre orthonormalized polynomials. The problem is reduced to integration of a system of differential equations by modified Taylor's method.

A numerical study of the three-layer glazing of some types of special equipment has been carried out on their compliance with the requirements of safety and reliability. The proposed approach can be used in the design of safe multilayer glazing of various vehicles in terms of operational and emergency thermal loads.