

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ БАГАТОШАРОВОГО ОСКЛІННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Сметанкін В.О., к. т. н., проф., Сметанкіна Н.В., д. т. н., пров. н. с.,
Сметанкін О.В., викладач

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка*

*Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
Харківський патентно-комп'ютерний коледж*

Запропоновано метод розрахунку міцності багатошарового оскління наземних транспортних засобів при впливі імпульсних та ударних навантажень. Модель оскління базується на уточненій теорії багатошарових пластин. Досліджено напруження у шарах оскління автомобільної техніки під дією повітряної ударної хвилі та ударі кульовим індентором.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших проблем при ліквідації наслідків техногенних аварій є забезпечення ефективної й надійної експлуатації наземного транспорту та безпека особового складу при виконанні рятувальних робіт. Вагома складова цієї проблеми – забезпечення міцності елементів конструкцій спеціальної техніки. Особливу увагу треба приділити осклінню, як одному з відповідальних елементів, від яких залежить життя людей [1, 2]. Воно повинно задовольняти вимоги щодо ударної міцності, вогнестійкості та надійності при умові збереження своїх експлуатаційних характеристик. Тому розрахунок та проектування елементів оскління спеціальної техніки, що відповідають зазначеним вище вимогам безпеки є актуальною проблемою.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Практична робота зі створення захисного оскління транспортних засобів привела до створення ГОСТ Р 51136-2008 [1]. Стандарт на безпечні багатошарові й загартовані стекла для засобів наземного транспорту (автомобілів, автобусів, тракторів, сільськогосподарських, будівельних і дорожньо-будівельних машин) регламентується ГОСТ 5727-88 [3]. При цьому методи дослідження міцності оскління засновані на емпіричних даних і спрощених моделях [4].

Як правило, автомобілі спеціальної техніки виробляються на базі шасі існуючих вантажівок (КамАЗ, ЗІЛ, МАЗ, КрАЗ). 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, який фіксується по периметру закладення замком із полімерного матеріалу чи гуми, Це дозволяє розглядати елементи оскління як шарнірно оперті пластини.

У роботі [5] встановлено, що створення захисного скла для спецтехніки

вимагає комплексного підходу і не припускає спрощеного розв'язання проблеми за рахунок звичайного наклеювання багатошарової полімерної плівки на раніше встановлене скло в рамі. Показано, що на сьогоднішній день триплекс (тобто багатошаровий склоблок) дешевше скла з багатошаровою полімерною плівкою.

Невирішеною проблемою залишається розробка ефективних методів розрахунку міцності багатошарового оскління в умовах дії аварійних навантажень, що виникають у результаті різноманітних вибухів.

Метою роботи є створення математичної моделі і розробка методу розрахунку міцності безпечного багатошарового оскління спецтехніки при впливі повітряної ударної хвилі та ударному навантаженні на основі уточненої теорії багатошарових пластин.

Математична модель багатошарового оскління. Будемо розглядати багатошарове скло як прямокутну багатошарову шарнірно оперту пластину, яка зібрана із I шарів постійної товщини h_i ($i = \overline{1, I}$). Динамічна поведінка пластини описується на основі кінематичних гіпотез, які враховують деформації поперечного зсуву, обтиснення по товщині та інерції обертання нормального елемента у межах кожного шару [6]. 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

$$u_k^i = u_k + \sum_{j=1}^{i-1} h_j u_{3+I(k-1)+j} + (z - \delta_{i-1}) u_{3+I(k-1)+i}, \quad k = 1, 2, 3, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

де $\delta_i = \sum_{j=1}^i h_j$, $\delta_{i-1} \leq z \leq \delta_i$; h_i – товщина i -го шару; $u_k = u_k(x, y, t)$ ($k = 1, 2, 3$) –

переміщення точки координатної поверхні в напрямку координатних осей; $u_{3+I(k-1)+i} = u_{3+I(k-1)+i}(x, y, t)$ ($k = 1, 2$) – кути повороту нормального елемента в i -му шарі навколо координатних осей; $u_{3+2I+i} = u_{3+2I+i}(x, y, t)$ – обтиснення нормального елемента в i -му шарі; t – час.

Метод розв'язання. Спочатку розглянемо вплив ударного навантаження. По пластині наноситься удар кульовим індентором радіуса R і масою M по зовнішній поверхні першого шару пластини. Індентор скидається на пластину з висоти H та у момент зіткнення з пластиною має швидкість

$$V = \sqrt{2gH},$$

де g – прискорення вільного падіння.

Рівняння руху індентора має вигляд

$$M z_{,tt} = M g - F, \quad z(0) = 0, \quad z_{,t}(0) = V,$$

де: $z = z(t)$ – переміщення індентора;

$F = F(t)$ – сила контактної взаємодії індентора й пластини.

Контактне зближення α враховується на основі розв'язання задачі Герца про вдавнення кулі в пружний півпростір [7]. Умова сумісності

переміщень записується як

$$w_0 + \alpha - z = 0,$$

$$\text{де } \alpha = \kappa_1 F^{2/3}, \quad \kappa_1 = \left[\frac{9(\theta_1 + \theta)}{256R} \right]^{1/3}, \quad \theta_1 = \frac{4(1 - \nu_1^2)}{E_1}, \quad \theta = \frac{4(1 - \nu^2)}{E}; \quad E, \nu -$$

модуль Юнга й коефіцієнт Пуассона матеріалу, з якого виготовлений індентор; E_1, ν_1 – аналогічні характеристики матеріалу першого шару пластини.

З варіаційного принципу Остроградського-Гамільтона [6] одержуємо рівняння руху пластини під впливом ударного навантаження та граничні умови.

Шукані функції та навантаження розвиваються у тригонометричні ряди

$$u_j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{jmn}(t) B_{jmn}(x, y), \quad p_j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{jmn}(t) B_{jmn}(x, y), \quad (2)$$

$$\text{де } B_{1mn} = \cos \frac{m\pi x}{A} \sin \frac{n\pi y}{B}, \quad B_{2mn} = \sin \frac{m\pi x}{A} \cos \frac{n\pi y}{B}, \quad B_{3mn} = \sin \frac{m\pi x}{A} \sin \frac{n\pi y}{B},$$

$$B_{3+i mn} = B_{1mn}, \quad B_{3+I+i mn} = B_{2mn}, \quad B_{3+2I+i mn} = B_{3mn}, \quad j = \overline{1, 3I+3}, \quad i = \overline{1, I};$$

A та B – розміри пластини у плані.

Розвинення контактної сили в тригонометричний ряд (2) має вигляд

$$p_{3mn} = \frac{12F(t)}{AB\rho_{mn}^2} \sin \frac{m\pi x_0}{A} \sin \frac{n\pi y_0}{B} \left(\frac{\sin \rho_{mn}}{\rho_{mn}} - \cos \rho_{mn} \right), \quad \rho_{mn} = \pi a(t) \sqrt{\frac{m^2}{A^2} + \frac{n^2}{B^2}}.$$

Таким чином, задача про коливання багатошарової пластини для кожного зі значень m і n зводиться до системи звичайних диференціальних рівнянь

$$[\Omega^{mn}] \Phi_{mn}'' + [\Lambda^{mn}] \Phi_{mn} = \mathbf{P}_{mn}, \quad (3)$$

де Φ_{mn} та \mathbf{P}_{mn} – вектори, компонентами яких є коефіцієнти розвинень (2),

$$\Phi_{mn} = \{\Phi_{jmn}(t)\}, \quad \mathbf{P}_{mn} = \{p_{jmn}(t)\}, \quad j = \overline{1, 3I+3}.$$

У рівняннях (3) $[\Omega^{mn}]$ та $[\Lambda^{mn}]$ – квадратні симетричні матриці [6]. Система (3) інтегрується за допомогою однокрокового методу [6], який базується на розвиненні розв'язку в ряд Тейлора.

Розв'язок рівняння руху індентора одержуємо на основі інтегрального перетворення Лапласа. Значення контактної сили $F(t)$ визначається з умови сумісності переміщень індентора та пластини. Після визначення коефіцієнтів розвинення шуканих функцій (2) обчислюються переміщення (1) та напруження у шарах пластини.

Найчастіше розрахунок динамічної міцності елементів автомобільної техніки під дією ударної хвилі замінюється на розрахунок під дією статичних сил з урахуванням коефіцієнта динамічності [1].

Пропонується вплив повітряної ударної хвилі описувати експоненціальною залежністю [2]

$$p_3(x, y, t) = \Delta p_\phi \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad (4)$$

де Δp_ϕ – надлишковий тиск на фронті ударної хвилі. Параметр T залежить від тривалості фази стискання.

Коефіцієнт розвинення навантаження (4) у ряд (2) має вигляд

$$P_{3mn} = \frac{4}{m\pi^2} \Delta p_\phi \exp\left(-\frac{t}{T}\right) (\cos m\pi - 1)(\cos n\pi - 1).$$

Чисельні дослідження міцності оскління при імпульсних та ударних навантаженнях. Згідно Держстандарту [3] вітрові стекла повинні витримувати удар кулею масою 227 г при температурі +40 °С та -20 °С. З десяти випробуваних при кожному значенні температури зразків не менш ніж вісім не повинні розбиватися на окремі частини й не менш чим для вісьмох куля не повинна проходити через зразок.

Досліджено вплив швидкості зіткнення при ударі сталеву кулею масою 227 г та радіусом 20 мм на максимальні розтягуючі напруження на прикладі вітрового скла КамАЗ-5320 з розмірами у плані $A=1024$ мм, $B=662$ мм. Оцінка міцності оскління проводилася на основі першої теорії міцності. Допустиме значення розтягуючих напружень $\sigma_{\max}=120$ МПа. Шари мають наступні характеристики: $h_1=5$ мм, $E_1=6,8 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_1=0,22$, $\rho_1=2500$ кг/м³ ($i=1, 3$); $h_2=2$ мм, $E_2=280$ МПа, $\nu_2=0,38$, $\rho_2=1200$ кг/м³ (ρ_i – густина матеріалу i -го шару).

На рис. 1 показано змінення у часі напружень на зовнішній поверхні третього шару скла для різних значень швидкості зіткнення. При $V=7$ м/с напруження наближаються до допустимих значень, а при $V=10$ м/с та $V=13$ м/с відбувається руйнування скла.

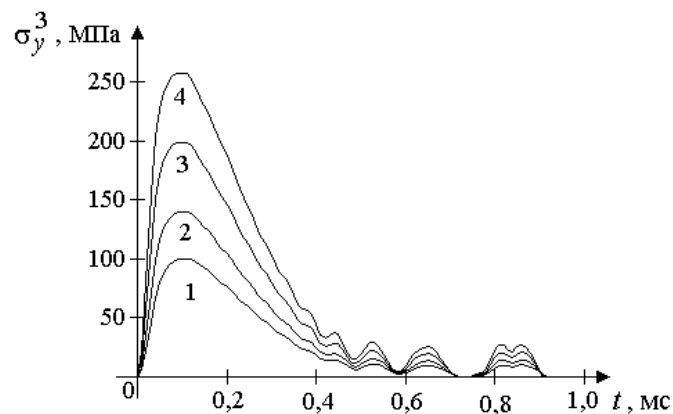


Рис. 1. Залежність напружень в осклінні від часу при різних швидкостях зіткнення: 1 – $V=5$ м/с, 2 – $V=7$ м/с, 3 – $V=10$ м/с, 4 – $V=13$ м/с

Також досліджено вплив маси кулі на напруження при швидкості зіткнення $V=5$ м/с. На рис. 2 наведені залежності напружень від часу. Коли

маса кулі дорівнює 400 г, напруження наближаються до своїх допустимих значень, при масі 500 г оскління руйнується.

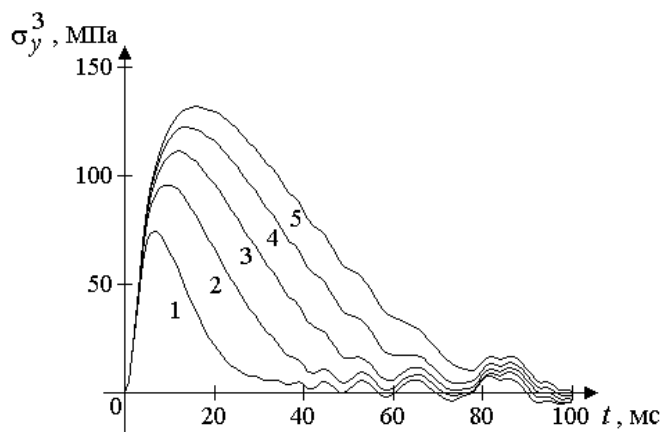


Рис. 2. Залежність напружень в осклінні від часу при ударі кулею різної маси:
1 – $M = 100$ г, 2 – $M = 200$ г, 3 – $M = 300$ г, 4 – $M = 400$ г, 5 – $M = 500$ г

При дослідженні впливу ударної хвилі надлишковий тиск на фронті ударної хвилі є рівним $\Delta p_{\phi} = 30$ кПа, час дії складає 1 с.

Розглянуто деформування оскління вітрового скла автомобіля КамАЗ-5320 під дією ударної хвилі з надлишковим тиском на фронті хвилі $\Delta p_{\phi} = 30$ кПа та часом дії 1 с. Встановлено, що максимальне значення розтягуючого напруження (100 МПа) не перевищує допустимого значення.

Висновки й перспективи подальших досліджень. На основі уточненої теорії розроблено аналітико-чисельний метод розрахунку на динамічну міцність оскління автомобільної техніки при впливі ударної хвилі та ударі твердим тілом. Визначені маса та швидкість індентору, за яких напруження в осклінні досягають допустимих значень. Проведено дослідження нестационарного напружено-деформованого стану оскління під дією ударної хвилі. Встановлено, що максимальне напруження у шарах не перевищило допустимого значення. Запропонований підхід може бути використаний при проектуванні безпечного багат шарового оскління засобів наземного транспорту з урахуванням аварійних впливів.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Бруль С.Т. К вопросу о моделировании воздействия ударной волны на корпус боевой машины / С.Т. Бруль, А.Ю. Васильев // Вісник НТУ «ХП» Машиноведение и САПР.– 2005. – №53. – С. 29–34.
3. 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.

4. Голяков В.И. Метод расчета взрывозащитного остекления / В.И. Голяков, А.А. Дайлов, В.А. Кишкин // Системы безопасности.– 2004.– № 4.– С. 26–27.
5. Мильков В.Г. Двухосноориентированная полиэтилентерефталатная пленка. Всегда ли необходима в пулестойком и взрывобезопасном остеклениях? / В.Г. Мильков // Технологии безопасности.– 2004.– № 6.– С. 24–26.
6. Сметанкина Н.В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек / Н.В. Сметанкина. – Харьков: Изд-во «Міськдрук», 2011.– 376 с.
7. Jones N. Structural impact / N. Jones. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989. – 320 p.

Аннотация

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Сметанкин В.А., Сметанкина Н.В., Сметанкин А.В.

Предложен метод расчета прочности многослойного остекления наземных транспортных средств при воздействии импульсных и ударных нагрузок. Модель остекления основана на уточненной теории многослойных пластин. Исследованы напряжения в слоях остекления автомобильной техники при воздействии воздушной ударной волны и ударе шаровым индентором.

Abstract

CALCULATION OF STRENGTH OF MULTILAYER GLAZING OF VEHICLES AT NONSTATIONARY LOADINGS

Smetankin V.A., Smetankina N.V., Smetankin A.V.

The method of strength calculation of the multilayer glazing at impulse and impact loadings vehicles is offered. The glazing model is based on the refined theory of multilayer plates. Stresses in layers of automobile technics glazing are investigated under an air shock wave and impact by spherical indenter.