УДК 629.56:539.4

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ З МЕТАЛ-СКЛЯНИМИ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ В УМОВАХ СУДНОВИХ ВІБРАЦІЙ

Казимиренко Ю. О., *д.т.н., професорка кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7120-8226;*
Лебедєва Н. Ю., *к.т.н., доцентка кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, e-mail: nataliia.lebedeva@nuos.edu.ua, ORCID 0000-0003-1326-450X*

Стаття присвячена вирішенню науково-технічної проблеми зниження вібрацій на суднах, що можливо застосуванням вібропоглинальних композиційних покриттів. Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні можливості експлуатації конструкцій з метал-скляними покриттями в умовах суднових вібрацій. Постановка досліджень включає у себе розв'язання задачі мікромеханіки для моделі двошарової пластини Ст3–метал-скляні покриття з урахуванням їх структурних особливостей, та експериментальні випробування на розтягування. За допомогою аналітичного опису мікрозсувних деформацій проаналізовано вплив полідисперсної структури покриттів на механізми поглинання пружно-пластичних хвиль динамічних коливань. Досліджено вплив морфології та об'ємного вмісту скляних наповнювачів, а саме порожніх скляних мікросфер, порошків натрійсилікатного та свинцевмісного скла на коефіцієнт вібраційних витрат, межу міцності та межу текучості. Розрахунки показали доцільність застосування метал-скляних покриттів в умовах суднових вібрацій, що пояснюється поглинанням енергії скляними включеннями сферичної та кутастої форми. Експериментально доведено, що пластини з покриттями несуттєво поступаються у міцності на розрив зразкам із Ст3; руйнування покриттів відбувається між скляними включеннями. Одержані результати мають наукове й практичне значення для проєктування суднових конструкцій з використанням композиційних матеріалів і покриттів.

Ключові слова: *суднові конструкції, метал-скляні покриття, скляні включення, вібраційна здатність, мікрозсувні деформації.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.175-185

Постановка проблеми. Зниження суднових вібрацій є важливою науково-технічною проблемою, вирішення якої розглядається науковими школами [1, 2] на етапах проєктування конструкцій. Динамічні коливання, які виникають під час роботи машинного відділення, гребних гвинтів, помп, систем кондиціювання, радіонавігаційного обладнання, жорсткозакріплених механізмів значно ускладнюють умови життєдіяльності плавскладу [3]. У процесі експлуатації в умовах суднових вібрацій, температурних навантажень, можливих механічних пошкоджень у конструкціях формується складний напружений стан, де на процеси руйнування впливають структурні особливості матеріалів. У роботах [4, 5] розглянуто перспективи використання у суднобудуванні сплавів високого демпфування: переваги впровадження марганцево-мідних, нікель-титанових, магнієвих сплавів пояснюється їх високою технологічністю і незалежністю ефектів демпфування від частоти коливань. Використання біметалічних зварних з'єднань високомарганцевих марганцево-мідних сплавів з низьковуглецевими сталями є доцільним для виготовлення опор, станін, амортизаторів; проте їх застосування для більш великогабаритних конструкцій є невиправдано дорогим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемним питанням підвищення демпфувальних властивостей конструкційних матеріалів присвячено роботи [6–8], у яких досліджено ефекти впливу зміни хімічного складу, термічної обробки, поверхневого зміцнення. Наукові уявлення про механізми вібропоглинання ґрунтуються на теорії внутрішнього тертя, яка розглядає процеси перетворення на теплову енергію [9]. Це пояснює переваги застосування композиційних матеріалів і покриттів, зокрема полімерних, у яких частка енергії механічного поля коливань розсіюється завдяки релаксаційним явищам у вигляді теплових хвиль [10]. Одним із шляхів зниження масогабаритних

показників суднобудівних конструкцій з реалізацією можливостей їх експлуатації за механізмами «розтягування–стискання» є застосування вібропоглинальних покриттів, перспективи впровадження яких зумовлені потребами у матеріалах, які, крім здатності послаблювати або поглинати енергію коливань, характеризуються ще низькою щільністю, водонепроникністю, термостійкістю [11]. Для багатьох полідисперсних середовищ явища поглинання енергії хвиль можна пояснити, аналізуючи мікромеханічні процеси у структурі композицій. Порівнюючи з компактними металами і сплавами застосування гетерогенних матеріалів у вібраційних умовах є більш переважним, що пояснюється впливом скупчення мікронерівностей на процеси незворотного розсіювання енергії. Саме цей ефект утворюється і при введенні у композиції сферичних включень, зокрема порожніх скляних мікросфер, що переважно застосовуються для формування композицій типу «синтактик», експлуатація яких уважається ефективною в умовах динамічних коливань, статичних навантажень, гідростатичного стискання [12]. Визначеним вимогам відповідають метал-скляні електродугові покриття, які у складі конструкцій біологічного захисту застосовуються на суднах і плавучих спорудах, призначених для транспортування і тривалого зберігання радіоактивних вантажів [13]. Результати експериментів з визначення їх демпфувальних властивостей наведено у роботі [14], проте вирішення завдань прогнозування міцності конструкцій вимагатиме комплексних досліджень з розв'язанням задач мікромеханіки, які б ураховували структурні особливості метал-скляних композицій, зокрема вплив морфології та об'ємного вмісту скляних наповнювачів на механічні властивості та вібропоглинальну здатність.

Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні можливості експлуатації конструкцій з метал-скляними покриттями в умовах суднових вібрацій, для чого необхідно вирішити **завдання**, пов'язані з дослідженнями процесів поглинання енергії структурними елементами метал-скляних покриттів та впливом морфології та об'ємного вмісту скляних наповнювачів на міцнісні характеристики і вібропоглинальну здатність.

Матеріали і методики досліджень. Формування метал-скляних покриттів здійснювалося за технологією електродугового напилення суцільнотягнутих дротів марок Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75) і Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70) на поверхні зі сталі звичайної якості Ст3 (ГОСТ 380-2005), що застосовується у суднобудуванні для виготовлення танків, цистерн, елементів біологічного захисту тощо. Вибір режимів та обладнання наведено в роботі [15]. У процесі напилення в зону дуги введено скляні наповнювачі: порожні скляні мікросфери натрійборсилікатного складу (ТУ 6-48-108-94), порошки, одержані сухим розмелом бою натрійсилікатного (ГОСТ 24315-802.0) та свинцевмісного скла (ГОСТ 9541-75). Їх гранулометричний склад, форму та стан поверхні досліджено методами оптичної і комп'ютерної металографії з використанням мікроскопів БИОЛАМ-И і ММР-2Р, за допомогою яких також досліджено особливості мікроструктури напилених метал-скляних покриттів.

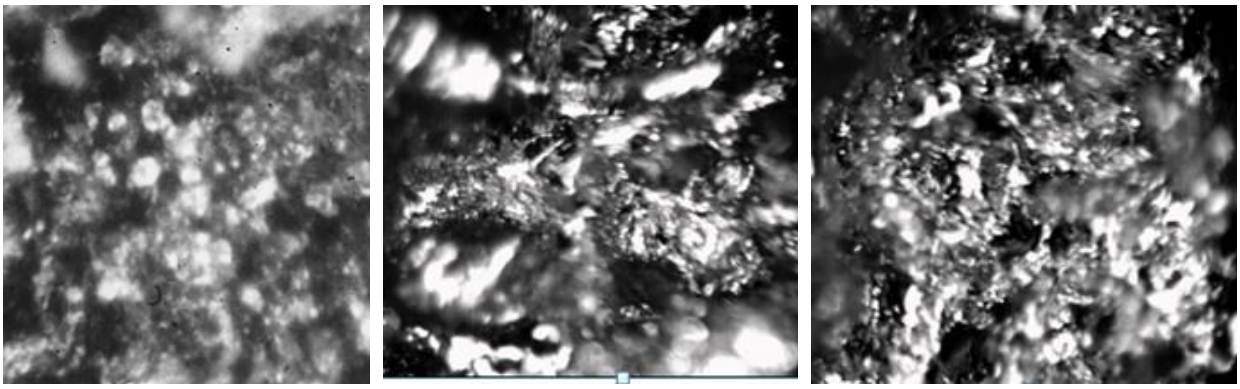
Теоретичні передумови досліджень ґрунтуються на наукових працях відомих учених в галузі теорії пружності [9], мікромеханіки композитів [16], теорії пружно-пластичних деформацій оболонок [17], фундаментальних досліджень динамічних коливань у пружних середовищах [18]. Для прогнозування можливості розроблених метал-скляних покриттів працювати в умовах суднових вібрацій застосовано метод енергії деформацій [9], який авторами роботи [10] пристосовано для полімерних дисперсно-наповнених композитів, де важливими показниками визначено об'ємний модуль пружності K_m і модуль зсуву G^*. Для їх визначення зі структури матеріалу виділиться певний елемент – елементарна комірка, яка складається із ділянки матриці, в середині якої розташовано дисперсне включення. Механічні властивості дисперсно-наповнених композитів визначаються з використанням основних положень теорії пружності [9] та описуються у аналітичному вигляді через ефективні пружні модулі.

Характеристика скляних наповнювачів і особливості структури покриттів. У табл. 1 наведено результати досліджень морфологічних характеристик скляних наповнювачів.

Таблиця 1 – Характеристики скляних наповнювачів

Скляний наповнювач	***Дисперсність*** d ***, мкм***	***Середній розмір частинок*** $d_{ср}$ ***, мкм***	***Середній фактор форми*** $F_{ср}$	***Умовний модуль об'ємного стискання скляного включення*** K_s ***, ГПа***
Порожні скляні мікросфери	20…100	40	1	41,72
Порошок натрійсилікатного скла	10…85	25	0,4	40,5
Порошок свинцевмісного скла	15…90	35	0,6	41,2

Напилений шар є структурно неоднорідним: як приклад на рис. 1 наведено оптичні мікрофотографії покриттів із Св-АМг5, наповнених порожніми скляними мікросферами (ПСМ) та скляних порошків, одержаних сухим розмелом скляного бою.



а) б) в)

Рисунок 1 – Мікроструктура (× 350) електродугових покриттів на основі Св-АМг5, наповнених (≈ 40 % об'ємн.):
а) порожніми скляними мікросферами; б) порошком натрійсилікатного скла; в) – порошком свинцевмісного скла

Структура покриттів являє собою пористу (до 12 %) металеву матрицю з рівномірно розташованими скляними включеннями, на поверхні поділу між якими при динамічних навантаженнях відбуваються мікрозсувні деформації, які сприятимуть додатковому поглинанню енергії коливань.

Визначення характеристик модуля зсуву метал-скляних покриттів.

Процес вібропоглинання у структурно неоднорідному середовищі покриття можна описати через деформації мікрооб'ємів, використовуючи поняття ефективного модуля зсуву G^* як функції механічних властивостей матриці і наповнювачів у складі композицій (табл. 2).

Таблиця 2 – Мікромеханічні характеристики метал-скляних покриттів

Характеристика	*Розрахункова формула*
Умовний модуль об'ємного стискання металевої комірки зі скляним включенням, K_m – визначає здатність пористої матриці чинити опір усебічному стисканню	$K_m = \frac{K'_m \cdot \vartheta_m}{1+\rho(1-\vartheta_m)}$, де ϑ_m – об'ємний вміст металу; ρ – щільність покриття
Об'ємний модуль пружності металевої комірки зі скляним включенням K'_m – характеризує спроможність комірки чинити опір зміні її об'єму	$K'_m = \frac{E_m}{3(1-2\nu_m)}$, де E_m, ν_m – модуль пружності і коефіцієнт Пуасона
Умовний модуль об'ємного стискання скляного включення K_s – визначає локалізацію деформації матриці навколо скляної частинки	$K_s = \frac{K_{cm} \cdot \psi}{1+\rho(1-\psi)}$, де $\psi = \frac{\rho_s}{\rho_c}$, де ρ_s – уявна густина скляних частинок; ρ_c – густина скла, з якого вони одержані
Об'ємний модуль пружності скляного включення K_c – характеризує спроможність включення чинити опір з боку металевої матриці	$K_c = \frac{E_{cm}}{3(1-2\nu_c)}$, де E_{cm}, ν_c – модуль пружності і коефіцієнт Пуасона

Для досліджень використано модельні уявлення про елементарну комірку, виділену із структури покриття, яка складається зі скляного включення із середнім розміром d, оточеного металевою матрицею (рис. 2).

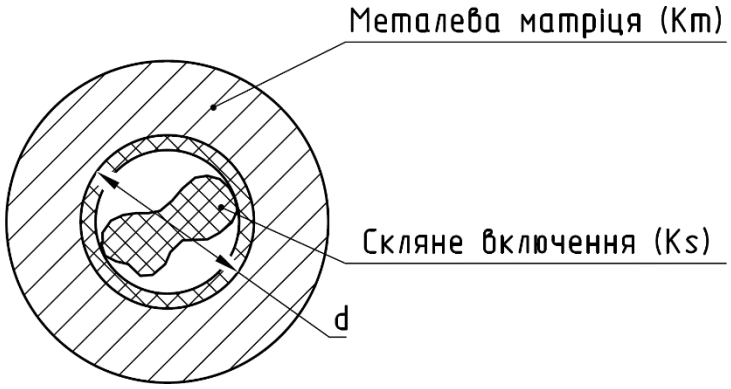


Рисунок 2 – Модель елементарної комірки метал-скляного покриття

Динамічні явища розсіювання енергії на сферичних включеннях та залежно від їх розміру проаналізовані в роботі [18], де автори при розв'язанні задачі поглинання енергії за принципом Гамільтона розглядають сферичний об'єм з фіксованим радіусом *R* як однорідний масив, знехтувавши малим розміром включень. На відміну від цього в даній роботі геометрична інтерпретація моделі елементарної комірки метал-скляного покриття враховує морфологічні характеристики скляних включень, вписуючи мінімальні розміри суцільних частинок у середину мікросфер більших діаметрів. Як показали розрахунки, умовний модуль об'ємного стискання суцільної скляної частинки K_s за умовами наближення її форми до сферичної несуттєво відрізняється від K_s порожньої сфери (табл. 1), для якої K_s = 41,72 ГПа. Наведені в табл. 2 мікромеханічні характеристики на мікрорівні визначають спроможність елементарної комірки поглинати енергію хвиль і залежать від дисперсності, форми та наповнення склом. Об'єм скляних включень у складі метал-скляних покриттів визначено методом хорд [20] за результатами мікроструктурних досліджень топографії поверхні.

Ефективні механічні характеристики метал-скляних покриттів з урахуванням їх пористої структури і об'ємного наповнення склом були визначені в роботі [19] і застосовуються для розрахунків ефективного модуля зсуву G^* за формулою Хашина–Штрикмана [9], яка для елементарної комірки (рис. 2) матиме вигляд:

$$G^* = \frac{3}{4}\frac{K_m}{\rho}, \qquad (1)$$

де K_m – умовний модуль стискання металевої матриці; ρ – щільність напиленого шару, яку розраховано за принципом адитивності для об'ємного наповнення від 10 до 40%, виходячи з технологічних обмежень напилення покриттів [14, 15].

Позитивний вплив об'ємного вмісту скляних включень на ефективний модуль зсуву G^* у графічному вигляді наглядно показаний на рис. 3.

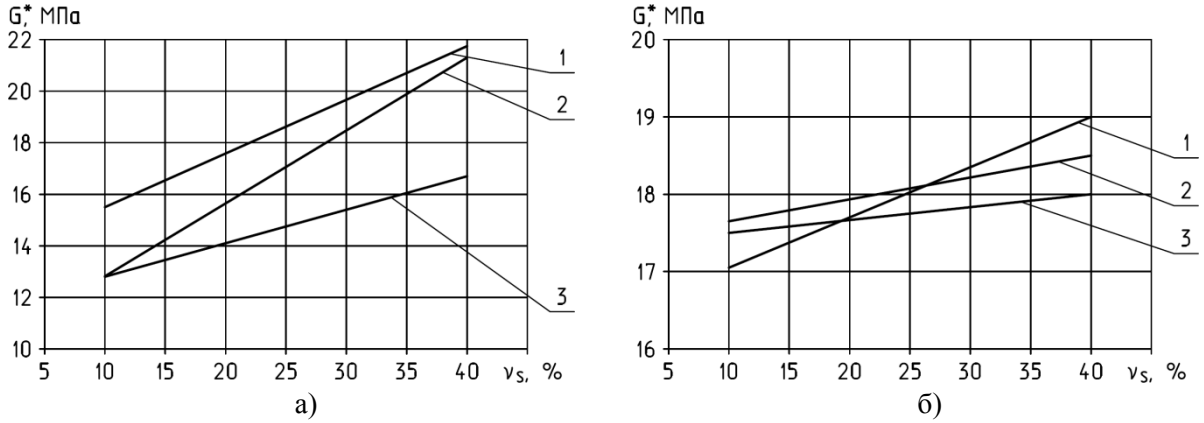


Рисунок 3 – Ефективний модуль пружності G^* метал-скляних покриттів
а) на основі Св-08Г2С; б) на основі Св-АМг5, наповнених:
1 – ПСМ; 2 – порошком свинцевмісного скла; 3 – натрійсилікатного скла

Розрахунки показали, що ефективний модуль зсуву покриттів на основі Св-08Г2С на 10…15 % перевищує G^* для покриттів на основі Св-АМг5: це пояснюється механічними властивостями металевої матриці. Як видно з рис. 3, найкращими показниками характеризуються покриття, наповнені порожніми скляними мікросферами, що зумовлено високою здатністю сферичних оболонок поглинати енергію динамічних коливань [17, 18] та зменшенням концентрації напружень на поверхні поділу фаз метал–скло [19]. Вплив фактору форми на опір метал-скляних покриттів зсувним деформаціям продемонстровано лініями 2 і 3, які визначають об'ємне наповнення порошками свинцевмісного скла краплеподібної форми та порошками натрійсилікатного скла кутастої форми.

Одержані значення використано для оцінювання вібропоглинальної здатності сталевих пластин з метал-скляними покриттями.

Визначення коефіцієнта вібраційних витрат двошарової пластини. Об'єктом дослідження є процес поглинання вібрацій двошаровою пластиною (рис. 4), яка складається зі сталевого листа 1 товщиною h_1 = 10 мм і модулем повздовжньої пружності E_1, на який нанесено шар 2 метал-скляного покриття товщиною h_2 = 2 мм і модулем повздовжньої пружності E_2.

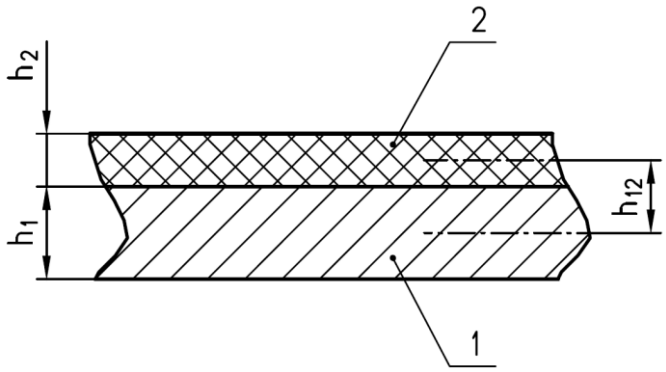


Рисунок 4 – Двошарова модель зразків для досліджень вібраційної здатності: 1 – сталевий лист; 2 – шар метал-скляного покриття

Поставлена задача полягає у дослідженні вібропоглинальної здатності сталевої пластини із Ст3, якщо на неї наноситься будь-який зі складів розроблених метал-скляних покриттів з різним наповненням склом. В основу досліджень покладено гіпотезу про поглинання основної частки енергії полідисперсним шаром, у якому розсіювання пружних хвиль відбувається на скляних включеннях. Для спрощення при постановці задачі не враховується частота суднових вібрацій та міцність зчеплення покриття зі сталлю.

Складність експериментального визначення вібраційної здатності метал-скляних покриттів зумовлена великою розбіжністю результатів і похибкою вимірювань через їх пористість. Для гетерогенних середовищ на практиці використовуються розрахункові та експериментальні методики [2, 21, 22] з аналітичним описом показників працездатності роботи конструкцій в умовах вібрацій.

За критерій обрано коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{вібр}$, який визначатиме здатність двошарової пластини (рис. 3) гасити вібрації та розраховується за формулою [21]:

$$\eta_{вібр} = \frac{\eta(f)}{1+[\alpha_2\beta_2(\alpha_2^2+12\alpha_{21}^2)]^{-1}}, \quad (2)$$

де $\eta(f)$ – коефіцієнт зсувних втрат матеріалу покриття; $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$ – відношення товщини шару покриття до товщини сталевого листа; $\beta_2 = \frac{E_2}{E_1}$ – відношення модулів поздовжньої пружності метал-скляного покриття і сталевого листа; $\alpha_{21} = \frac{h_{21}}{h_1}$, де h_{21} – відстань між центральними площинами.

Розрахунки виконано за наступними числовими значеннями [21]: $\eta(f) = (2\ldots4)\cdot10^{-3}$; $h_{21} = 6$ мм. Модуль поздовжньої пружності метал-скляного покриття визначається як $E_2 = 3G^*(f)$. Об'ємний вміст наповнювачів у складі метал-скляних покриттів становить від 10 до 40 %. При визначенні пружних модулів E_2 і G^* для формули (2) враховано ступінь відхилення їх фактору форми від ідеальної сферичності. Результати розрахунків значень коефіцієнта вібраційних втрат $\eta_{вібр}$ наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти вібраційних втрат двошарових пластин Ст3− покриття

Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	***Коефіцієнт вібраційних втрат,*** $\eta_{вібр}$	***Об'ємний вміст скла у складі композиції, %***	***Коефіцієнт вібраційних втрат,*** $\eta_{вібр}$	***Об'ємний вміст скла у складі композиції, %***	***Коефіцієнт вібраційних втрат,*** $\eta_{вібр}$
Покриття Св-АМг5–ПСМ		Покриття Св-АМг5–натрійсилікатне скло		Покриття Св-АМг5–свинцевмісне скло	
10	0,5	10	0,43	10	0,4
40	0,46	40	0,41	40	0,39
Покриття Св-08Г2С−ПСМ		Покриття Св-08Г2С–натрійсилікатне скло		Покриття Св-08Г2С–свинцевмісне скло	
10	0,49	10	0,59	10	0,59
40	0,35	40	0,45	40	0,35

Виконані розрахунки показали, що пластина Ст3–метал-скляне покриття при обраному співвідношенні товщин має достатньо високий коефіцієнт вібраційних втрат: 0,35…0,6, що свідчить про доцільність подальшого використання такого двошарового з'єднання в умовах суднових вібрацій. Збільшення у складі електродугових покриттів скляних наповнювачів призводить до зниження $\eta_{вібр}$ на 5…15 %, проте їх вібропоглинальна здатність через масштабний фактор не залежить від форми скляних включень.

Ураховуючи той факт, що додаткове накладання механічних навантажень може викликати руйнування всієї двошарової конструкції, в роботі експериментально досліджено статичні механічні характеристики двошарових пластин.

Експериментальні дослідження двошарової пластини на розтягування. Межу міцності на розрив $\sigma_в$ і межу текучості $\sigma_т$ двошарових пластин визначено за результатами розтягування зразків за допомогою розривної машини ИР 5057-50; швидкість навантаження склала 2,5 мм/хв. Для випробувань застосовано пластини Ст3 розміром 140×100×1,5 мм з напиленими покриттями товщиною 1,5 мм; об'ємний вміст скляних наповнювачів у складі покриттів склав близько 40 %. Для порівняння розтягування зазнали зразки з покриттями із Св-08Г2С і Св-АМг5 без наповнювача. Одержані результати (табл. 4) зіставлено з механічними властивостями пластин Ст3, розтягнутих за аналогічними умовами, де межа міцності на розрив $\sigma_в$ складатиме 365,0 МПа, а межа текучості $\sigma_т$ – 292,5 МПа.

Таблиця 4 – Механічні властивості двошарових пластин Ст3–покриттями

Властивості	***Скляний наповнювач у покритті***			
	ненаповнене покриття	***порожні скляні мікросфери***	***натрій-силікатне скло***	***свинцевмісне скло***
Ст3 з покриттям на основі Св-08Г2С (δ =1,5 мм)				
Межа міцності на розрив $\sigma_в$, МПа	323,0	315,0	344,0	318,0
Межа текучості $\sigma_т$, МПа	265,0	260,0	275,0	260,0
Ст3 з покриттям на основі Св-АМг5 (δ = 1,5 мм)				
Межа міцності на розрив $\sigma_в$, МПа	327,0	328,0	338,18	336,15
Межа текучості $\sigma_т$, МПа	268,0	266,0	287,0	284,0

Результати досліджень показали, що зразки з покриттями несуттєво поступаються у міцності Ст3: межа міцності на розрив $\sigma_в$ у середньому на 15…20 % нижче ніж у пластин Ст3, а межа текучості $\sigma_т$ – приблизно на 10 %. Максимальні значення механічних властивостей спостерігаються у зразках, наповнених порошками натрійсилікатного скла,

що можна пояснити їх вихідними властивостями і фізико-хімічними процесами, що відбуваються під час електродугового напилення на поверхні поділу метал–скло. Мікроструктурні дослідження поперечного перетину розірваних зразків показали, шо руйнування покриттів відбувається між скляними включеннями.

Порівняння результатів досліджень з літературними й експериментальними даними. Одержані результати досліджень носять узагальнений характер, опосередковано підтверджуються теоретичними роботами [10-12, 16-18] та узгоджуються з результатами, експериментально одержаними авторами у роботах [14, 19].

Наукове і практичне значення результатів та перспективи подальших досліджень. Одержані в роботі результати показали можливість експлуатації сталевих конструкцій з метал-скляними покриттями із Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених порожніми скляними мікросферами, порошками натрійсилікатного та свинцевмісним стеклом, в умовах суднових вібрацій і розширюють наукові уявлення про механізми поглинання енергії композиційними покриттями зі скляними включеннями. Удосконалено теоретичний підхід до визначення вібраційної здатності двошарових пластин з гетерогенним шаром, який ураховує механізми зсувних деформацій на поверхні поділу фаз, виходячи із об’ємного наповнення склом.

Практична цінність роботи полягає у якісній оцінці можливості експлуатації сталевих конструкцій з метал-скляними покриттями в умовах динамічних і статичних навантажень.

Подальші дослідження пов’язані з апробацією одержаних результатів на масштабному факторі, розробленням практичних рекомендацій щодо експлуатації з визначенням певних величин частот суднових вібрацій.

Висновки

1. За допомогою аналітичного опису мікрозсувних деформацій на поверхні поділу фаз метал–скло проаналізовано вплив полідисперсної структури метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених порожніми скляними мікросферами, порошками натрійсилікатного і свинцевмісного скла, на механізми поглинання пружно-пластичних хвиль динамічних коливань. Визначено, що ефективний модуль зсуву покриттів на основі Св-08Г2С на 10…15 % перевищує G^* для покриттів на основі Св-АМг5; найкращими показниками характеризуються покриття, наповнені порожніми скляними мікросферами.

2. За результатами розв’язання задачі мікромеханіки встановлено вплив об’ємного вмісту скляних порошків (10…40 %), уведених до складу електродугових покриттів із Св-08Г2С і Св-АМг5, на коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{вібр}$ двошарової пластини Ст3–покриття, який складатиме 0,35…0,6. Збільшення у складі електродугових покриттів скляних наповнювачів призводить до зниження $\eta_{вібр}$ на 5…15 %, проте їх вібропоглинальна здатність через масштабний фактор не залежить від форми скляних включень.

3. Експериментально досліджено вплив метал-скляних покриттів на статичні механічні характеристики сталевих пластин: нанесення шару товщиною 1,5 мм на 15…20 % знижує межу міцності на розрив $\sigma_в$ і приблизно на 10 % – границю текучості $\sigma_т$; найвищі показники міцності мають покриття, наповнені порошком натрійсилікатного скла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дятченко С. В., Тананыкин С. В. Исследование влияния конструкции корпуса и загрузки промыслового судна и его вибрационные характеристики. *Известия КГТУ*. Калининград, 2007. № 12. С. 36–41.

2. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. Москва : Университетская книга : Логос, 2008. 424 с.

3. Факторы, формирующие среду обитания при эксплуатации объектов водного транспорта / Л. М. Мацкевич, А. М. Вишневский, А. Б. Разлетова [и др.]. *Казанский медицинский журнал.* 2009. Т. 90. № 4. С. 597–600.

4. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахштадт А. Г. Металловедение высокодемпфирующих сплавов : монография. Москва : Металлургия, 1980. 272 с.

5. Лебедева Н. Ю. Исследование свариваемости высокодемпфирующего марганцево-медного сплава Г80Д15Х3Н2. *Збірник наукових праць УДМТУ.* Миколаїв : УДТУ, 2002. № 4 (382). С. 72–77.

6. Бащенко Г. А. Влияние легирования на выделение охрупчивающих фаз при старении сплавов системы Mn-Cu. *МиТОМ.* 1999. № 11. С. 36–39.

7. Лебедева Н. Ю. Влияние термической обработки и температур нагрева на демпфирующие свойства марганцево-медных сплавов. *Збірник наукових праць УДМТУ.* Миколаїв : УДТУ, 2002. № 3 (381). С. 48–52.

8. Зенькевич А. А., Проскуряков В. И., Егоров И. С., Щелкунов А. Ю. Упрочнение поверхности титанового сплава ВТ6 в результате электропластической деформации. *Молодой ученый.* 2019. № 25 (263). С. 106–108.

9. Landau L. D., Livshic E. M. Teorija uprugosti. Moskva : Fizmatiz, 2007. 264 p.

10. Черкасов В. Д., Юркин Ю. В., Авдонин В. И. Прогнозирование демпфирующих свойств композита с учетом температурной зависимости свойств полимера. *Вестник ТГАСУ.* 2012. № 4. С. 216–225.

11. Кирпичников В. Ю., Савченко В. В., Смольников В. Ю., Шлемов Ю. Ф. Разработка новых высокоэффективных средств вибродемпфирования судовых конструкций. *Труды Крыловского государственного центра.* 2019. № 1 (387). С. 167–174.

12. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках / С. А. Атрошенко, С. И. Кривошеев, А. А. Уткин и др. Журнал технической физики. 2002. Т. 72, вып. 12. С. 54–58.

13. Kazymyrenko, Y. The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo. *The advanced science.* 2016. Iss. 2. P. 38–44.

14. Казимиренко Ю. А., Лебедева Н. Ю. , Карпеченко А. А. и др. Исследование демпфирующих свойств электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами. *Збірник наукових праць НУК.* Миколаїв : НУК, 2013. № 1 (446). С. 56–59.

15. Казимиренко Ю. А., Лебедева Н. Ю., Карпеченко А. А. и др.Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений. *Наукові нотатки : міжвузівській збірник.* Луцьк : ЛНТУ, 2013. № 41, Ч. 1. С. 117–121

16. Ванин Г. А. Микромеханика композиционных материалов. Київ : Наук. думка, 1985. 304 с.

17. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва : Наука, 1967. 984 с.

18. Пирс А. Д. Колебания сферических включений в упругих твердых телах. *Акустический журнал.* 2005. Т. 51, № 1. С. 9–22.

19. Kazymyrenko Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials. *The advanced science journal.* 2016. Iss. 1. P. 90–94.

20. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. Москва : Металлургия, 1976. 271 с.

21. Валянтис К. И., Попов Ю. Н., Шляпочников С. А. Расчет коэффициента потерь металлической пластины, облицованной вибропоглощающим покрытием из высоконаполненного полиуретана. *Материалы науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества».* URL : http://www.ejta.org.

22. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов : справочник. Київ : Науква думка, 1971. 375 с.

REFERENCES

1. Djatchenko S. V. & Tananykin, S. V. (2007). Issledovanie vlijanija konstrukcii korpusa i zagruzki promyslovogo sudna i ego vibracionnye harakteristiki. *Izvestiya KGTU. (12),* 36–41.

2. Ivanov, N. I. (2008). Inzhenernaja akustika. *Teorija i praktika bor'by s shumom.* Moskva : Universitetskaja kniga, Logos.

3. L. M. Mackevich, A. M. Vishnevskiyj, A. B. Razletova at el. (2009). Faktorih, formiruyuthie sredu obitaniya pri ehkspluatacii objhektov vodnogo transporta. *Kazanskiyj medicinskiyj zhurnal. Vol. 90. Issue 4.* 597–600.

4. Favstov, Ju. N., Shul'ga, Ju. N., & Rahshtadt, A. G. (1980). *Metallovedenie vysokodempfirujushhih splavov.* Moskva : Metallurgija.

5. Lebedeva, N. Ju. (2002). Issledovanie svarivaemosti vysokodempfirujushhego margancevo-mednogo splava G80D15H3N2. *Zbirnyk naukovyh prac' UDMTU, 4(382),* 72–77.

6. Bashhenko, G. A. (1999). Vlijanie legirovanija na vydelenie ohrupchivajushhih faz pri sarenii splavov sistemy Mn-Cu. *MiTOM, 11,* 36–39.

7. Lebedeva, N. Ju. (2002). Vlijanie termicheskoj obrabotki i temperatur nagreva na dempfirujushhie svojstva margancevo-mednyh splavov. *Zbirnyk naukovyh prac' UDMTU, 3(381),* 48–52.

8. Zenjkevich A. A., Proskuryakov V. I., Egorov I. S., Thelkunov A. Yu. (2019). Uprochnenie poverkhnosti titanovogo splava VT6 v rezuljtate ehlektroplasticheskoyj deformacii. *Molodoyj uchenihyj, 25 (263),* 106–108.

9. Landau, L. and Livshic, E. (2007). *Teorija uprugosti*. Moskva: Fizmatiz.

10. Cherkasov, V. D., Jurkin, Ju. V., & Avdonin, V. I. (2012). Prognozirovanie dempfirujushhih svojstv kompozita s uchetom temperaturnoj zavisimosti svojstv polimera. *Vestnik TGASU, 4, 216–225*.

11. Kirpichnikov, V. Ju., Savchenko, V. V., Smol'nikov, V. Ju., & Shlemov, Ju. F. (2019). azrabotka novyh vysokojeffektivnyh sredstv vibrodempfirovanija sudovyh konstrukcij. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo centra, 1(387),* 167-174.

12. Atroshenko, S. A., Krivosheev, S. I., & Utkin, A. A. (2002). Razrushenie sferoplastika pri staticheskih i dinamicheskih nagruzkah. *Zhurnal tehnicheskoj fiziki, 72(12),* 54–58.

13. Kazymyrenko, Y. (2016). The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo. *The advanced science jornal, 2,* 38–44.

14. Kazymyrenko, Y. A., Lebedeva, N. Ju., & Karpechenko, A. A. (2013). Issledovanie dempfirujushhih svojstv jelektrodugovyh pokrytij, napolnennyh polymi stekljannymi mikrosferami. *Zbirnyk naukovih prats NUK, 1(446),* 56–59.

15. Kazymerenko, Y. A., Lebedeva, N. Ju., Karpechenko, A. A., & Zhdanov, A. A. (2013). Formirovanie jelektrodugovyh pokrytij s povyshennoj prochnost'ju, dempfirujushhej sposobnost'ju i kojefficientom pogloshhenija izluchenij. *Naukovi notatki : mizhvuz. zb., 1(41),* 117–121.

16. Vanin, G. (1985). *Mikromehanika kompozicionnyh materialov*. Kiev: Naukovadumka.

17. Vol'mir, A. S. (1967). *Ustojchivost' deformiruemyh sistem.* Moskva : Nauka.

18. Pirs, A. D. (2005). Kolebanija sfericheskih vkljuchenij v uprugih tverdyh tealh. *Akusticheskij zhurnal, 51(1),* 9–22.

19. Kazymyrenko, Y. (2016). The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials. *The advanced science journal, 1,* 90–94.

20. Saltykov, S. A. (1976). *Stereometricheskaja metallografija.* Moskva : Metallurgija.

21. Valjantis, K. I., Popov, Ju. N., Shljapochnikov, S. A. (2012). Raschet kojefficienta poter' metallicheskoj plastiny, oblicovannoj vibropogloshhajushhim pokrytiem iz

vysokonapolnennogo poliuretana. Sessija Nauchnogo soveta RAN po akustike i XXVII sessija Rossijskogo akusticheskogo obshhestva.

22. Pisarenko, G. S., Jakovlev, A. P., & Matveev, V. V. (1971). *Vibropogloshhajushhie svojstva konstrukcionnyh materialov.* Kyev : Naukova dumka.

Казимиренко Ю. А., Лебедева Н. Ю. ПОВЫШЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С МЕТАЛЛ-СТЕКЛЯННЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Статья посвящена решению научно-технической проблемы снижения вибраций на судах с помощью нанесения вибропоглощающих композиционных покрытий. Цель работы заключается в теоретическом обосновании возможности эксплуатации конструкций с металл-стеклянными покрытиями в условиях судовых вибраций. Постановка исследований включает в себя решение задачи микромеханики, поставленной на модели двухслойной пластины Ст3–металл-стеклянные покрытия, учитывающей их структурные особенности, а также механические испытания на растяжение. С помощью аналитического описания микросдвиговых деформаций проанализировано влияние полидисперсной структуры покрытий на механизм поглощения упруго-пластических волн динамических колебаний. Исследовано влияние морфологии и объемного содержания стеклянных наполнителей, а именно порошков натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекол на коэффициент вибрационных потерь, предел прочности и предел текучести. Расчеты показали целесообразность применения металл-стеклянных покрытий в условиях судовых вибраций, что объясняется поглощением энергии стеклянными включениями сферической и угловатой форми. Экспериментально показано, что пластины с покрытиями незначительно уступают в прочности на разрыв образцам из Ст3; разрушение покрытий происходит между стеклянными включениями. Полученные результаты имеют научное и практическое значение для проєктирования судовых конструкций с использованием композиционных материалов и покрытий.

Ключевые слова: *судовые конструкции, металл-стеклянные покрытия, стеклянные включения, вибрационная способность, микросдвиговые деформации.*

Kazymyrenko Y., Lebedieva N. THEORETICAL PREREQUISITES FOR OPERATION OF STRUCTURES WITH METAL-GLASS PROTECTIVE COATINGS ON BOARD A VESSEL IN VIBRATION ENVIRONMENT

The article is devoted to looking for a solution for the scientific and technical issue of reducing vibrations on vessels. It is considered to be achieved with the application of the vibration-absorbing composite coatings. The purpose of the work is to theoretically substantiate the possibility of operation of structures with metal-glass coatings taking into consideration the vibration environment of a vessel. The formulation of the research includes the discovery of the solution for the micromechanics issue set up on the model of a two-layer plate St3 – metal-glass coatings, taking into account their structural features, and experimental tensile tests. The influence of the polydisperse structure of coatings on the mechanisms of absorption of elastic-plastic waves of dynamic oscillations has been analyzed with the help of the analytical description of microdisplacement deformations. The influence of morphology and volume content of glass fillers, specifically hollow glass microspheres, powders of sodium silicate and lead-containing glass on the vibration coefficient, strength limit and yield strength has been investigated. Calculations have shown the feasibility of using metal-glass coatings in conditions of vessel vibration, which is due to the absorption of energy by glass inclusions of spherical and angular shape. It has been experimentally proven that coated plates are slightly inferior in tensile strength to samples with St3; the destruction of coatings occurs between glass inclusions. The obtained results have scientific and practical significance for the design of ship structures using composite materials and coatings.

Keywords: *vessel structures, metal-glass coatings, glass inclusions, vibration ability, microdisplacement deformations.*

© Казимиренко Ю. О., Лебедєва Н. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 14.05.20