

О. І. Редько

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ДЕФОРМАЦІЙ СИСТЕМИ “ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ – МЕТАЛЕВА ОСНОВА”

Досліджено вплив вмісту і природи дисперсних наповнювачів на фізико-механічні властивості епоксидних композитів. Показано, що для підвищення когезійної міцності матеріалів у пластифікований зв'язувач необхідно вводити частки зольних мікросфер та карбіду кремнію з дисперсністю 63 мкм. Додатково показано, що для поліпшення когезійних властивостей композитів необхідно вводити у зв'язувач 5–15 мас.ч. вступеного вермикуліта (10–20 мкм).

***Ключові слова:** епоксидна матриця, наповнювач, композит, властивості, міцність.*

Постановка проблеми

Основою інженерних розрахунків є оцінювання міцності металів та сплавів в умовах напружено-деформованого стану. Необхідними також є дослідження при динамічних навантаженнях пружних властивостей і деформацій захисних покриттів, які нанесені на металеву основу. На сучасному етапі розвитку матеріалознавства перспективним і цікавим з наукової точки зору є дослідження пружних властивостей та деформацій систем “покриття–основа” з використанням діаграм напруженого стану на різних етапах навантаження матеріалу. Одним із методів вирішення такої задачі є розроблення нових підходів для дослідження деформацій при одноісних навантаженнях системи “покриття–основа”, що дозволяє експериментально визначити значення напружень у кожній точці покриття і основи на різних стадіях деформації. Крім того, важливим є дослідження критичних напружень або деформацій покриття та основи при багатоступінчастому режимі навантаження системи “покриття–основа”. Аналіз таких результатів дозволяє визначити адгезійні та когезійні властивості захисних покриттів [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як зазначалося вище, важливим при динамічних навантаженнях є оцінювання напружено-деформованого стану як основи, так і покриття. Відомо, що внаслідок деформування матеріалу у основі та покритті виникають напруження у напрямку дії навантаження і у перпендикулярному напрямку [2]. При цьому слід враховувати, що досягнення високої адгезійної міцності покриттів до основи не є основним підходом для підвищення надійності і ресурсу експлуатації елементів конструкцій за критичних умов. До того ж висока адгезійна міцність не завжди є доцільною, позаяк покриття зі значною адгезією характеризуються не завжди високими показниками когезійної міцності. У цьому плані доцільним є використання двохшарових захисних покриттів, де адгезій-

ний шар забезпечує міцність зчеплення покриття з металевою основою, а поверхневий — забезпечує підвищення когезійних властивостей матеріалів. Водночас необхідним є встановлення оптимального вмісту двокомпонентного полідисперсного наповнювача у захисних покриттях на основі композитних матеріалів (КМ), які характеризуються високими показниками як адгезійної, так і когезійної міцності.

Мета роботи — дослідити пружні властивості та деформації системи “захисне покриття–металева основа” і встановити оптимальний вміст у КМ двокомпонентного полідисперсного наповнювача для формування покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Методика та матеріали дослідження

Об’єктом дослідження вибрано епоксидний олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78). Як пластифікатор використано дибутилфталат (ГОСТ 2102-72). Зв’язувач формували при такому вмісті інгредієнтів, мас.ч.: епоксидний олігомер ЕД-20 – 100, пластифікатор дибутилфталат – 8, твердник ПЕПА – 8. З метою з’ясування впливу фізичної природи і топології поверхні наповнювачів на властивості КМ використано грубодисперсні (63мкм) і дрібнодисперсні (10–20мкм) частки. Як грубодисперсні наповнювачі застосовували зольні мікросфери (ЗМ) (ТУ 5712-010-80338612-2008), частки коричневого шламу (КШ) і карбіду кремнію. Як дрібнодисперсні наповнювачі використовували частки вспученого вермикуліта (ВВ), газової сажі (ГС) і оксиду хрому зеленого (ГОСТ 2912-79).

Важливим напрямком оцінки міцності матеріалу при руйнуванні є експериментально-розрахункове визначення максимальних значень нормальних напружень (когезійна міцність) у будь-якому напруженому стані і тангенціальних напружень (адгезійна міцність), які виникають на межі поділу фаз “покриття–основа”. Такі умови потребують створення методик розрахунку, які дозволяють б оцінити граничні величини напруженого стану матеріалу. Теорія розрахунку, а також методика досліджень фізико-механічних характеристик, розроблена на основі теорії міцності [3–5]. Було досліджено адгезійну і когезійну міцність епоксикомпозитів, сформованих на сталевій основі. Використана методика досліджень при випробуванні одного зразка дозволяє отримати значення деформації, адгезійної та когезійної міцності, модуля пружності покриття і основи, а також охарактеризувати вид руйнування композиту [3].

Для дослідження використано на стандартний плоский зразок зі сталі Ст.3 (ГОСТ 3248-81), на який до половини довжини робочої частини з обох сторін основи симетрично наносили покриття (рис. 1). Зовнішні параметри зразка (основи), а також розміри нанесених покриттів були такими: товщина: $h_o = 1,00 \pm 0,01$ мм, $h_n = 0,40-0,45$ мм; площа: $S_o = 9,8 \pm 0,2$ мм²; $S_n = 2,0 \pm 0,1$ мм², де: індекси “о” і “п” означають, що характеристики відносяться до основи і покриття.

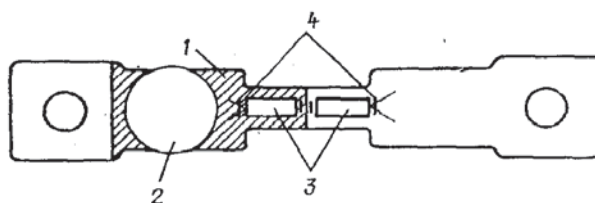


Рис. 1. Зразок для визначення фізико-механічних властивостей матеріалу: 1 — покриття; 2 — датчик АЕ; 3 — тензодатчики; 4 — позначки для вимірювання деформації оптичним методом

Експеримент виконували на розривній машині FM-1000. Зразок навантажували ступінчасто, збільшуючи зовнішнє навантаження на 250Н. Величину ступеня навантаження визначали, використовуючи зразки без покриття. При цьому ступінь навантаження має бути таким, щоб у області пружних деформацій основи було виміряно декілька характеристик системи “основа–покриття” для накопичення статистичної інформації. Під час зупинок навантаження зразка з покриттям ($t = 10\text{с}$) автоматично записували сигнали при різних зусиллях навантаження. За результатами досліджень будували залежність “напруження–відносна деформація” у зразку з покриттям і без нього. На основі отриманих результатів будували криві залежності напружень від відносних деформацій у покриттях.

Модуль пружності визначали, аналізуючи пружну ділянку на кривих розтягу за формулою:

$$E_n = \left(\frac{\mathcal{E}_o}{\mathcal{E}_n} - 1 \right) \cdot \frac{\delta_o}{2\delta_n} \cdot E_o,$$

де індекси “о” і “п” означають, що характеристики відносяться до основи і покриття, ε — відносна деформація.

Когезійну міцність або нормальні напруження визначали за формулою:

$$\sigma_n = \frac{2\mathcal{E}_o}{hk^2} \cdot \frac{G_o/H \cdot G_n/H}{G_o/H + G_n/H} \left(1 + \frac{chkz}{chkl} \right),$$

де G — модуль зсуву; H — товщина покриття і основи; h — товщина покриття.

Адгезійну міцність або тангенціальні напруження визначали за формулою:

$$\tau = \frac{\mathcal{E}_o k}{t \left(\frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_o F_o} \right)} thkl,$$

де

$$k^2 = 2tl \left(\frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_o F_o} \right), \quad L = \frac{G_o/H \cdot G_n/h}{G_o/H + G_n/h}$$

F — сила розтягу.

Експериментально-розрахункова методика дозволяє протягом одного випробування на одному зразку визначити комплекс величин, що характеризують фізико-механічні властивості системи “основа–покриття”: величину модулів пружності основи і покриття, значення критичної деформації композиту, рівень напружень у ньому та в області адгезійного контакту, а також встановити вид руйнування системи (розтріскування чи відшарування).

Обговорення експериментальних результатів дослідження

Досліджували вплив різного вмісту основного і додаткового наповнювачів на властивості покриттів. Важливим було поєднання в одній системі

дисперсних часток різної фізичної природи і дисперсності, що поліпшує адгезійні і когезійні властивості матеріалів. Тому, враховуючи результати попередніх випробувань адгезійних і фізико-механічних (руйнівне напруження при згині, модуль пружності при згині, ударну в’язкість, залишкові напруження) властивостей КМ, досліджували різні варіанти формування покриттів [6, 7]. Як основний наповнювач використано частки ЗС, КШ і SiC з дисперсністю 63мкм при вмісті 10–80 мас.ч. Як додатковий наповнювач використано частки ВВ, ГС, Cr₂O₃ з дисперсністю 10–20 мкм при вмісті 5–50 мас.ч.

Для визначення оптимального вмісту двокомпонентного полідисперсного наповнювача використовували метод багатофакторного планування експерименту (табл. 1). Для вибраної кількості факторів та рівнів варіювання побудовано план експерименту, який показано у вигляді робочої частини матриці (табл. 2). Відомо, що однією з найбільш важливих характеристик КМ, яка визначає довговічність матеріалу у процесі експлуатації, є адгезійна міцність покриття до основи і когезійна міцність самого покриття [2]. Тому критерієм оптимізації вибрано адгезійну і когезійну міцність КМ, які досліджували за описаною вище методикою.

Таблиця 1

Фактори та рівні варіювання

№п/п	Фактори	Позначення	Рівні варіювання		
1	Вид основного наповнювача	X ₁	ЗС	КШ	SiC
2	Вид додаткового наповнювача	X ₂	ВВ	ГС	Cr ₂ O ₃
3	Вміст основного наповнювача, мас.ч.	X ₃	10–80		
4	Вміст додаткового наповнювача, мас.ч.	X ₄	5–50		

Аналіз результатів досліджень показав, що найвищу адгезійну міцність мають покриття, сформовані за варіантами 2 і 9 (табл. 3). Доведено, що введення часток ЗС (10 мас.ч.) і ГС (5 мас.ч.) у комплексі забезпечує формування покриттів з найвищими показниками адгезійної міцності до металевої основи (серед усього спектру досліджуваних матеріалів), яка становить $\tau_{\max} = 76,4$ МПа. Когезійна міцність такого покриття становить $\sigma_n = 54,2$ МПа. Це зумовлено хімічною активністю дисперсних часток до зв’язувача, яка визначається кількістю активних центрів на поверхні наповнювача. Введення часток ЗС і ГС за оптимального вмісту у пластифікований епоксидний зв’язувач забезпечує утворення у гетерогенній системі матеріалу у стані зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ). Такі шари відзначаються підвищеним ступенем зшивання, що збільшує міцність матеріалів. Відповідно, поліпшена адсорбція макромолекул і надмолекулярних структур на поверхні дисперсних часток за рахунок взаємодії активних центрів твердої фази з OH-, C≡N і C=N₂ групами зв’язувача забезпечує перехід значної кількості полімера у стан ЗПШ. Це, у свою чергу, зумовлює підвищення адгезійної і когезійної міцності захисних покриттів.

Таблиця 2

План експерименту

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	ЗС	ВВ	20	5
2	ЗС	ГС	10	5
3	ЗС	Cr ₂ O ₃	30	20
4	ЗС	ВВ	30	20
5	ЗС	Cr ₂ O ₃	50	40
6	КШ	ВВ	40	10
7	КШ	ГС	50	10
8	КШ	Cr ₂ O ₃	60	20
9	КШ	ВВ	50	5
10	КШ	Cr ₂ O ₃	50	50
11	SiC	ВВ	40	10
12	SiC	ГС	60	5
13	SiC	Cr ₂ O ₃	40	20
14	SiC	ВВ	60	20
15	SiC	Cr ₂ O ₃	80	40

Таблиця 3

Залежність адгезійної і когезійної міцності покриттів від природи та вмісту двокомпонентного полідисперсного наповнювача

№ п/п	Адгезійна міцність, τ_{\max} , МПа	Когезійна міцність, $\sigma_{\text{п}}$, МПа	Вид руйнування покриття
1	38,4**	68,0*	відшарування
2	76,4*	54,2**	розтріскування
3	46,9*	56,3**	відшарування
4	35,2**	82,1*	відшарування
5	36,1*	42,8**	розтріскування
6	52,4*	48,4**	відшарування
7	64,6*	40,6**	розтріскування
8	42,4**	34,2*	розтріскування
9	67,2*	52,1**	розтріскування
10	33,7**	72,3*	відшарування
11	35,2*	64,6**	відшарування
12	37,7**	66,01*	відшарування
13	49,9**	56,0*	розтріскування
14	45,2*	67,3**	відшарування
15	44,8**	76,9*	відшарування

Значення адгезійної і когезійної міцності покриттів наведено згідно варіантів за планом експерименту (табл. 2). * Експериментальні дані міцності покриттів: $\tau_{\max} = \tau_{\text{адгез. міц.}}$ при відшаруванні, $\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{когез. міц.}}$ при розтріскуванні покриттів. ** Розрахункові значення міцності покриттів.

Слід зазначити, що високими показниками адгезійної міцності відзначаються також покриття, сформовані на основі пластифікованої епоксидної матриці, яка містить частки КШ (50 мас.ч.) і ВВ (5 мас.ч.). Адгезійна міцність такого покриття становить $\tau_{\max} = 67,2$ МПа, а когезійна міцність — $\sigma_{\text{п}} = 52,1$ МПа (табл. 3). Заува-

жимо, що наповнювач КШ також характеризуються значною активністю до взаємодії з макромолекулами епоксидного зв'язувача, а додаткове введення дрібнодисперсних часток ВВ при вказаному вмісті забезпечує перехід значної кількості полімера у стан ЗПШ. Відповідно це поліпшує властивості матеріалу.

Крім того, експериментально встановлено, що високими показниками когезійної міцності відзначаються покриття, сформовані за варіантами 4, 10 і 15. Показано, що введення часток ЗС (30 мас.ч.) і ВВ (20 мас.ч.) забезпечує формування покриттів з когезійною міцністю $\sigma_p = 82,1 \text{ МПа}$, при цьому адгезійна міцність становить — $t_{\text{max}} = 35,2 \text{ МПа}$ (табл. 3). Введення у зв'язувач часток КШ (50 мас.ч.) і Cr_2O_3 (50 мас.ч.) забезпечує формування покриттів з когезійною міцністю $\sigma_p = 72,3 \text{ МПа}$, при цьому адгезійна міцність становить — $t_{\text{max}} = 33,7 \text{ МПа}$. Введення у зв'язувач часток SiC (80 мас.ч.) і Cr_2O_3 (40 мас.ч.) забезпечує формування покриттів з когезійною міцністю $\sigma_p = 76,9 \text{ МПа}$, при цьому адгезійна міцність становить — $t_{\text{max}} = 44,8 \text{ МПа}$. Аналізуючи результати дослідження можна констатувати, що для формування захисних покриттів з поліпшеною когезійною міцністю, порівняно з адгезійними композитами, необхідно збільшувати вміст двокомпонентного наповнювача з різною дисперсністю. Експериментально встановлено, що критичний вміст часток наповнювача різної природи у комплексі при формуванні покриттів з поліпшеними адгезійними властивостями знаходиться у межах від 15 до 55 мас.ч. (табл. 3). Водночас при формуванні покриттів з поліпшеними когезійними властивостями критичний вміст наповнювача різної природи і дисперсності у комплексі міститься у діапазоні від 50 до 120 мас.ч. (табл. 3). Отримані результати можна пояснити різними механізмами процесів міжфазової взаємодії при структуроутворенні КМ. Попередньо було встановлено, що введення наповнювача приводить до формування ЗПШ зі зміненими властивостями навколо часток у матеріалі матриці, причому об'єм поверхневих шарів зростає при зменшенні дисперсності часток [7, 8]. Виходячи з цього формували КМ і покриття на їх основі, вводячи у зв'язувач двокомпонентний полідисперсний наповнювач. У процесі формування КМ навколо дрібнодисперсних (10–20 мкм) і грубодисперсних (63 мкм) часток формуються ЗПШ, що суттєво збільшує когезійну міцність покриттів. При цьому введення часток двокомпонентного наповнювача лише при критичному вмісті забезпечує максимальне підвищення показників когезійної міцності КМ. Експериментально встановлено, що введення часток у зв'язувач при незначній кількості призводить до формування КМ з невисокими показниками когезійної міцності (табл. 3, варіант 2). Це можна пояснити тим, що у цьому випадку формуються ЗПШ незначного об'єму, а когезійна міцність КМ визначається в основному когезійними властивостями самої матриці. Навпаки, введення активного двокомпонентного наповнювача (ЗС + Cr_2O_3 чи КШ + Cr_2O_3) при значному вмісті (табл. 3, варіанти 5 і 8) зумовлює формування структури ЗПШ з дефектами, які зумовлені недостатнім змочуванням часток. Це також призводить до погіршення когезійної міцності КМ і захисних покриттів на їх основі.

Як було показано вище, для формування захисних покриттів з підвищеними показниками адгезійної міцності необхідно вводити двокомпонентний наповнювач при незначному вмісті (15–55 мас.ч.). Це, на наш погляд, зумовлено тим, що при структуроутворенні КМ макромолекули пластифікованої епоксидної матриці взаємодіють з активними центрами як на пове-

рхні часток, так і на поверхні металевої основи. Методом ІЧ-спектроскопії встановлено, що на межі поділу фаз “матриця–металева основа” при структуроутворенні покриття виникають зв’язки типу -Me-OH або -Me-CN груп. Саме ці групи є активними центрами, які забезпечують покращення процесу тверднення полімерної матриці, а також якісно змінюють фізико-хімічну взаємодію на межі поділу фаз у композиті [9]. Відповідно, змінюються і фізико-хімічні властивості полімерного зв’язувача внаслідок взаємодії з поверхнею металевої основи і частками наповнювача.

Для підтвердження наведених вище припущень і експериментальних результатів проводили аналіз кривих залежності напружень від відносних деформацій, а також якісно оцінювали характер руйнування досліджуваних зразків. При цьому зазначимо, що згідно теорії деформацій [10] характер руйнування КМ залежить не тільки від фізико-механічних властивостей, але й від виду напружено-деформованого стану. Експериментально встановлено, що покриття з високими показниками адгезійної міцності характеризуються невисокими напруженнями і значними відносними деформаціями (рис. 2). Зокрема показано, що покриття з частками ЗС (10мас.ч.) і ГС (5 мас.ч.) мають значення критичних напружень (напруження при руйнуванні) $\sigma = 119,8\text{МПа}$ при відносній деформації $\varepsilon_p = 4,9\%$. Аналогічно покриття з частками КШ (50 мас.ч.) і ВВ (5 мас.ч.) мають значення критичних напружень (напруження при руйнуванні) $\sigma = 68,2\text{МПа}$ при відносній деформації $\varepsilon_p = 4,6\%$. Для таких матеріалів характерний вид руйнування — розтріскування, що свідчить про підвищені адгезійні властивості при незначній когезійній міцності.

Навпаки, покриття зі значною когезійною міцністю (криві 2, 4 і 5 на рис. 2) характеризуються високими показниками напружень і незначною відотною деформацією. Показано, що покриття з частками ЗС (30 мас.ч.) + ВВ (20 мас.ч.) мають значення критичних напружень $\sigma = 158,4\text{МПа}$ при відносній деформації $\varepsilon_p = 2,7\%$, покриття з частками КШ (50 мас.ч.) + Cr_2O_3 (50 мас.ч.) мають значення критичних напружень $\sigma = 118,6\text{МПа}$ при відносній деформації $\varepsilon_p = 3,4\%$, а покриття з частками SiC (80 мас.ч.) + Cr_2O_3 (40 мас.ч.) мають значення критичних напружень $\sigma = 158,4\text{МПа}$ при відносній деформації $\varepsilon_p = 2,7\%$. Для таких матеріалів характерний вид руйнування—відшаровування, що свідчить про підвищені когезійні властивості при незначній адгезійній міцності.

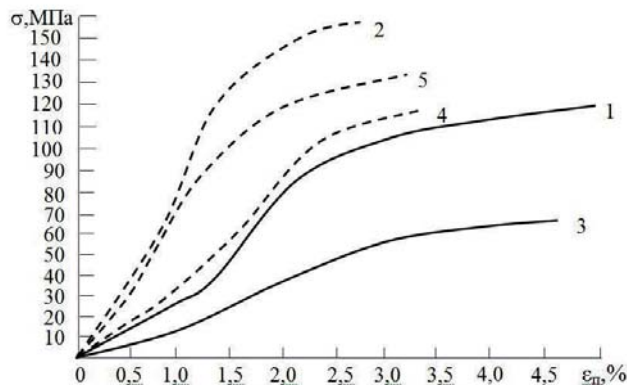


Рис. 2. Залежність напружень від відносних деформацій у покриттях, що містять двокомпонентний наповнювач, мас.ч. на 100 мас.ч. пластифікованого епоксидного зв’язувача:
 1 — ЗС (10) + ГС (5); 2 — ЗС (30) + ВВ (20); 3 — КШ (50) + ВВ (5); 4 — КШ (50) + Cr_2O_3 (50); 5 — SiC (80) + Cr_2O_3 (40)

Отже, можна стверджувати, що матеріали з високими показниками адгезійної міцності руйнуються з розтріскуванням, що свідчить про високу стійкість до тангенціальних напружень. Для матеріалів з відносно невисокою адгезією характерний інший вид руйнування покриття—відшаровування, що свідчить про низьку стійкість до дотичних напружень і вищу когезійну міцність систем (табл. 3). Визначення характеру руйнування покриттів є якісним підтвердженням достовірності результатів експерименту стосовно визначення адгезійно-когезійних властивостей системи "захисне покриття—металева основа".

Висновки

Виходячи з наведеного вище можна стверджувати, що залежно від природи, вмісту і дисперсності наповнювача формуються композитні матеріали і захисні покриття на їх основі з підвищеними показниками адгезійної чи когезійної міцності. При цьому для підвищення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування доцільно на поверхню деталей машин і механізмів наносити двошарові захисні покриття, у яких перший шар (адгезійний) відзначається поліпшеними адгезійними властивостями, а другий (поверхневий) характеризується підвищеними показниками когезійної міцності.

Встановлено, що найліпшою адгезійною міцністю відзначаються покриття на основі пластифікованої епоксидної матриці, яка містить частки зольних мікросфер (10 мас.ч.) і газової сажі (5 мас.ч.). Такий композит можна рекомендувати для формування адгезійного шару у двошарових захисних покриттях. Найкращими когезійними властивостями відзначаються покриття на основі пластифікованої епоксидної матриці, яка містить частки зольних мікросфер (30 мас.ч.) і вспученого вермикуліту (20 мас.ч.) або коричневого шламу (50 мас.ч.) і оксиду хрому (50 мас.ч.) або карбиду кремнію (80 мас.ч.) і оксиду хрому (50 мас.ч.). Такі композити можна використовувати для формування поверхневого шару у двошарових захисних покриттях залежно від їх функціонального призначення.

Исследовано влияние концентрации и природы дисперсных наполнителей на физико-механические свойства эпоксидных композитов. Показано, что для повышения когезионной прочности материалов в пластифицированное связующее необходимо вводить частицы зольных микросфер и карбида кремния с дисперсностью 63мкм. Дополнительно показано, что для повышения когезионных свойств композитов необходимо вводить в связующее 5–15 мас.ч. вспученого вермикулита (10–20 мкм).

Ключевые слова: *эпоксидная матрица, наполнитель, композит, свойства, прочность.*

The influence of content and nature of dispersed fillers on physical and mechanical properties of epoxy composites is investigated. It is shown that to increase the cohesion strength of materials it is necessary to enter the ash microspheres parts and silicon carbide with disperse of 63mcm in plasticized oligomer. More shows that to improve the cohesion properties of composites it is necessary to enter 5–15 m.p. of vermiculite (10–20 mcm) in oligomer.

Keywords: *epoxy matrix filler composite properties, strength.*

II. Результати наукових досліджень

1. *Колмогоров В. Л.* Напряжение, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 312 с.
2. *Долгов Н. А.* Влияние коэффициента Пуассона на предельное напряженное состояние покрытия / Н. А. Долгов, Б. А. Ляшенко // Проблемы прочности. – 2002. – № 1. – С. 71–77.
3. *Методика* определения механических характеристик композиции металл – защитное покрытие / Б. А. Ляшенко, С. Ю. Шаривкер, О. В. Цыгулев и др. // Проблемы прочности, 1989. – № 8. – С. 113–115.
4. *Уманский Э. С.* Условия адгезионной и когезионной равнопрочности жаростойких покрытий / Э. С. Уманский, Б. А. Ляшенко // Космические исследования на Украине. – 1975. – Вып. 6. – С. 58–64.
5. *Веремчук В. С.* Напряженно-деформируемое состояние моментов конструкций с покрытием при наличии пластических деформаций / В. С. Веремчук // Проблемы прочности. – 1986. – № 12. – С. 47–52.
6. *Стухляк П. Д.* Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов. – Тернопіль: Збруч. – 2009. – 237 с.
7. *Букетов А. В.* Вплив активності наповнювача на властивості епоксидних матеріалів / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, В. І. Бадищук // Вісник ТДТУ. – Тернопіль. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 12–20.
8. *Букетов А. В.* Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, Є. М. Кальба. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
9. *Привалко В. П.* Молекулярное строение и свойства полимеров. – Л.: Химия, 1986. – 314 с.
10. Сопrotивление материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.