

УДК 621.793.620.172

DOI: 10.18372/0370-2197.1(106).19836

В. Б. ШАМРАЙ

*Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна*

## **ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОВЕРХОНЬ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ, СФОРМОВАНИМИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ**

*Наведено результати оцінки напружено-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування, що дозволило вибрати оптимальний варіант конструкції поверхні, режими процесу нанесення покриття та склад композиційного матеріалу. Проведені дослідження композиційних електроіскрових покриттів змінної суцільності показали, що покриття суцільністю 70...90% мають набагато менші напруження, ніж покриття, що нанесені суцільним шаром. Виконані дослідження показали, що шляхом зміни суцільності та товщини покриття, а також підбором матеріалів за фізико-механічними характеристиками можливо мінімізувати напружено-деформований стан зміцнювальних поверхонь і керувати ним.*

**Ключові слова:** електроіскрове легування, зносостійкість, напружено-деформований стан, композиційні покриття.

**Вступ.** Багаточисельні дослідження [1-4] показали, що раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми забезпечення міцності, твердості, зносостійкості та триботехнічних властивостей деталей машин є застосування композиційних покриттів, перевагами яких є висока міцність, жорсткість і зносостійкість.

Вирішення поставленої проблеми пов'язане з вибором складу та способу формування композиційних покриттів.

В якості матеріалу для нанесення зносостійких покриттів використовують композиційні матеріали з металевою матрицею, яка об'єднуючи в одне ціле армуючий наповнювач, рівномірно розподіляє напруження, забезпечує несучу здібність композиту і захищає наповнювач від механічних ушкоджень і окислення. Наповнювачами в композиційних матеріалах служать дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів і карбідів, основною функцією яких є їх зміцнення.

Для підвищення зносостійкості використовуються різні методи нанесення композиційних покриттів: наплавленням, газотермічним напиленням, електроіскровим легуванням, а також різні комбіновані методи [1, 2]. Аналіз літературних джерел показав, що більшість методів нанесення композиційних покриттів альтернативні [1, 2]. Вибір способу формування композиційного покриття визначається умовами експлуатації деталей машин, конструкцією деталей та їх матеріалом, складом композиційного покриття та його економічною доцільністю.

Виконаний літературний огляд [1-5] способів зміцнення та відновлення композиційними покриттями дозволив сформулювати основні вимоги до технологічного процесу їх нанесення, яким відповідає метод електроіскрового легування. Метод електроіскрового легування, який є дискретним по своїй природі, дозволяє формувати зносостійкі композиційні покриття різної суцільності на основі карбідів, оксидів, боридів, самофлюсуючих сплавів. Зносостійкість композиційних покриттів, отриманих методом електроіскрового

легування зв'язують з утворенням дрібнодисперсних карбідних часток, які володіють високою твердістю. До нинішнього часу формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування є однією з невирішених задач в проблемі підвищення зносостійкості деталей машин. Таким чином, підвищення зносостійкості деталей машин шляхом формування композиційних покриттів дозволить вирішити проблему забезпечення їх строку служби, який не поступається строку служби нових деталей.

**Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем.** Великий внесок у розвиток формування покриттів методом електроіскрового легування внесли українські та закордонні вчені Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. І., Верхотуров А. Д., Гитлевич А. Є., Подчерняєва І. О., Ляшенко Б. А., Feldshteina E.E., Мао Y., Xie Y.J., Wang M.C., Johnson R.N., Reynold J.L. та ін. Електроіскрові покриття - зміцненні ділянки, розташовані на робочих поверхнях з певною суцільністю. Наявність у поверхневому шарі ділянок підвищеної твердості, оптимальної суцільності, геометрії та глибини впровадження в поверхню усуває концентрацію напружень від контактних навантажень та перериває процес тріщиноутворення, що суттєво підвищують міцність та експлуатаційну надійність [3, 5].

Основною перевагою покриттів, сформованих електроіскровим методом, є можливість шляхом зміни їх суцільності та товщини, а також підбором гами матеріалів за фізико-механічними характеристиками, створювати умови досягнення найменшого коефіцієнта тертя та зносу, керувати та мінімізувати напружено-деформований стан поверхні [3, 5].

Формування електроіскрових покриттів змінної суцільності обумовлено необхідністю зниження залишкових напружень у покритті та обмеження дотичних напружень у площині адгезійного контакту, що в умовах високих контактних навантажень має вирішальне значення для продовження терміну служби деталей. Дискретний характер електроіскрових покриттів виключає відшаровування покриття, різко підвищують його зносостійкість, оскільки покриття змінної суцільності обмежує його локальне перенапруження, яка є причиною зносу суцільних покриттів. Електроіскрові покриття змінної суцільності мають набагато менші мікронапруження, ніж при нанесенні покриттів суцільним шаром. Покриття, сформовані електроіскровим методом, збільшують термін служби деталей в 2 ... 2,5 рази. Твердість покриттів досягає HRC 55...60. Дискретний характер електроіскрових покриттів дозволяє багаторазово підвищити граничний стан покриття: контактні навантаження – у кілька разів, критичні деформації розтягування зміцнювальної поверхні – до 2 порядків, довговічність – у кілька разів. Відмінною особливістю електроіскрових покриттів є можливість забезпечувати необхідні експлуатаційні властивості деталей [3,5].

Для визначення розмірів електроіскрових покриттів змінної суцільності запропонований експериментально – розрахунковий метод, який враховує залишкові напруження [5]. Достовірність методу підтверджена експериментально прямим виміром кроку тріщини [5].

Пропонований метод дозволяє на стадії проектування розрахувати розмір ділянки електроіскрового покриття змінної суцільності з урахуванням залишкових напружень та проаналізувати вплив їх величини та знаку на процес когезійного розтріскування. Випробування на розтяг стандартних зразків товщиною 1,5 мм проводили на установці FM-1000. Крок тріщин  $S_n$  вимірювали

за допомогою оптичного мікроскопа МИР-12. В роботі [5] показано зміну напружень у покритті  $\sigma_n^{ef}$  за його довжиною:

$$\sigma_n^{ef} = \sigma_n^{зал} + \sigma_n^{експ} \quad (1)$$

де  $\sigma_n^{зал}$  – залишкові напруги в покритті, виміряні методом гнучкого зразка,  $\sigma_n^{експ}$  – експлуатаційні напруження в покритті, що виникають під дією прикладеного до зразка навантаження:

$$\sigma_n^{експ} = \frac{\varepsilon_k}{h \left( \frac{1}{hE_n} + \frac{1}{HE_0} \right)} \left[ 1 - \frac{ch(kz)}{ch(kl)} \right], \quad (2)$$

де  $\varepsilon_k$  – критична деформація основи під дією зовнішнього навантаження  $P$ ;  $l$  – базовий розмір;  $H, h$  – товщина основи та покриття;  $E_0, E_n$  – модулі пружності основи та покриття,

$$k^2 = 2 \frac{\frac{G_0 G_n}{Hh}}{\frac{G_0}{H} + \frac{G_n}{h}} \left( \frac{1}{hE_n} + \frac{1}{HE_0} \right), \quad (3)$$

де  $G_0, G_n$  – модулі зсуву основи та покриття.

З урахуванням того, що  $\sigma_f = \sigma_n^{експ} + \sigma_n^{зал}$  із співвідношення:

$$\frac{\sigma_n^{експ} + \sigma_n^{залиш}}{\sigma_f} = 0,9 \quad (4)$$

та залежності (2)

$$1 - \frac{ch[k(l - C_n)]}{chkl} + \frac{\sigma_n^{осм}}{\varepsilon_k} \frac{1}{E_n} = 0,9. \quad (5)$$

Звідси:

$$ch[k(l - C_n)] = \left( 0,1 + \frac{\sigma_n^{осм}}{\varepsilon_k} \frac{1}{E_n} \right) ch(kl). \quad \dots (6)$$

Після перетворень вираз для кроку тріщини:

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left( 0,1 + \frac{\sigma_n^{осм}}{\varepsilon_k} \frac{1}{E_n} \right). \quad (7)$$

Формула (7) дозволяє закласти розміри ділянки електроіскрового покриття змінної суцільності на стадії його конструювання. Крім того, з її допомогою можна побудувати залежність кроку тріщини від співвідношення залишкових напружень і когезійної міцності покриття при різній товщині останнього [5].

Таким чином, запропонований в роботах [5] метод дозволяє на стадії проектування розрахувати розмір ділянки електроіскрового покриття змінної суцільності з урахуванням залишкових напружень та проаналізувати вплив величини та знаку залишкових напружень на процес когезійного розтріскування.

Отже основна мета електроіскрових покриттів змінної суцільності – забезпечити поряд з адгезійною міцністю системи «зміцнювальна поверхня покриття мінімальний рівень її напружено-деформованого стану під впливом експлуатаційних навантажень. Досягти поставленої мети можна шляхом вибору суцільності та товщини електроіскрових композиційних покриттів, які повинні забезпечувати мінімальну концентрацію напружень як у шарі покриття, так і в

площині адгезійного контакту. Параметри електроіскрових композиційних покриттів вибираються за напружено-деформованим станом композиції «зміцнювальна поверхня-покриття».

**Мета роботи** – оцінка напружено-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування

**Методика проведення експерименту.** Для створення композиційних покриттів використовували установку "Елітрон-22" для електроіскрового легування. В якості матеріалу композиційних покриттів використовували карбід вольфраму ВК8 (WC – 8%Co), композиційний матеріал КХН-25 (тип Cr-Ni-C, склад - 75% Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> + 25% Ni) ТУ У 322-19-12-99, ніхром - сплав Х20Н80 (Ni-Cr 80/20).

Методика розрахунку напружень полягала в тому, що будувалась кінцево-елементна модель композиції «зміцнювальна поверхня – покриття» з розподілом еквівалентних напружень по Мізесу, задавались фізико-механічні властивості матеріалів зміцнювальної поверхні та покриття, а також граничні умови у вигляді силового навантаження та закріплення. При розрахунку задавали модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для матеріалів зміцнювальної поверхні ( $E_0=2,0E+05$  МПа,  $\nu_0=0,25$ ), та покриття із ВК8 ( $E_n = 4,40E+05$  МПа,  $\nu_n = 0,25$ ) і КХН25 ( $E_n = 3,75E+05$  МПа,  $\nu_n = 0,25$ ). Для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) композиції «зміцнювальна поверхня – покриття» використовували метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє будувати розрахункові схеми виходячи з фізичної постановки задачі, а варіаційно-різнична природа МСЕ робить можливим математичний аналіз розрахункових моделей більш точним.

При проведенні досліджень використовували ножі подрібнюючого барабану комбайну (рис. 1, а). Оскільки в ножах найбільш навантаженими є робочі кромки то аналізу підлягала тільки різальна частина ножа (рис. 1, б), яку розбивали на гексагональні скінченні елементи. Мінімальний розмір скінчених елементів вибрали 500 мкм, при цьому модель різальної частини ножа мала 1989 вузлів і 1576 елементів (рис. 1, б). Товщина покриття 0,1...0,5 мм. Твердість покриття визначається твердістю його матеріалу та може досягати 62 HRC.

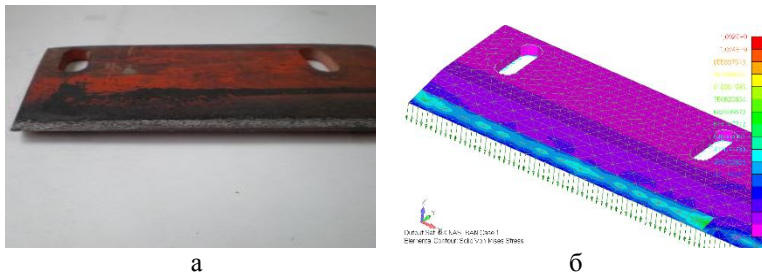


Рис. 1. Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з покриттям ВК8, нанесеним суцільно.

Реалізація методу скінчених елементів дозволяє візуально представляти результати моделювання НДС.

**Обговорення основних результатів.** Забезпечити поряд з адгезійною та когезійною міцністю композиційних покриттів, сформованих методом електроіскрового легування, мінімальний рівень напружено-деформованого стану під впливом експлуатаційних навантажень можна шляхом вибору

суцільності та товщини покриттів, яка повинна забезпечувати мінімальну концентрацію напружень як у шарі покриття, так і в площині адгезійного контакту. Суцільність та товщину покриттів визначали за напружено-деформованим станом композиції зміцнювальна поверхня - покриття виходячи з умов мінімізації рівня її напружено-деформованого стану.

Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з покриттям ВК8 нанесеним суцільно представлені на рисунку 1, змінної суцільності на - рисунку 2, а розподіл еквівалентних напружень в моделі - на рисунку 3.

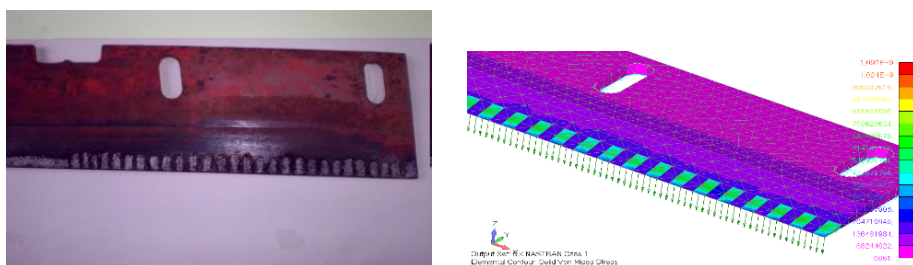


Рис. 2. Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з покриттям змінної суцільності із карбіду вольфраму ВК8.

Результати чисельного моделювання моделі композиції «зміцнювальна поверхня-покриття» з розподілом еквівалентних напружень по Мізесу від дії розтягуючої сили представлено на рис. 3.

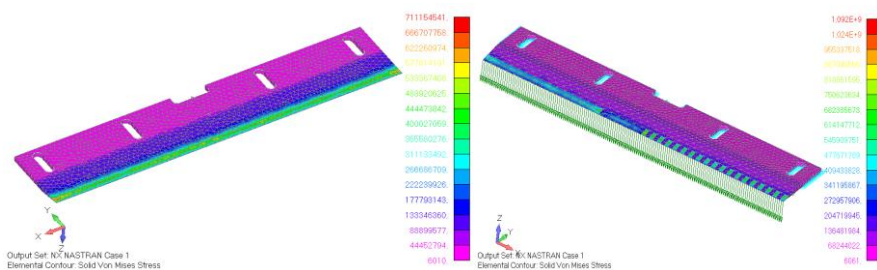


Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень від дії силового навантаження в моделі ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з суцільним електроіскровим покриттям (а) і з покриттям змінної суцільності з карбіду вольфраму ВК8.

При аналізі напружено-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування було враховано, що спосіб електроіскрового легування дискретний за своєю природою [5]. У більшості випадків елементи конструкцій деталі з покриттям працюють в умовах дії нормального навантаження. Для спрощення розрахунків використовувалась розрахункова схема представлена на рисунку 4.

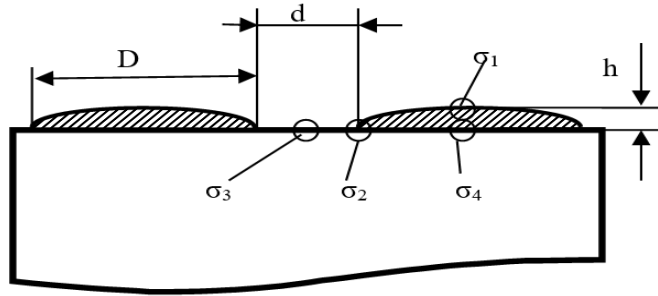


Рис. 4. Схематичне зображення композиції основа-покриття з параметрами, що змінюються, і зонами напружень:  $\sigma_1$  – напруження в центрі покриття;  $\sigma_2$  – напруження на краю покриття;  $\sigma_3$  – напруження в основі між ділянками покриття (дискетами);  $\sigma_4$  – напруження в основі під покриттям

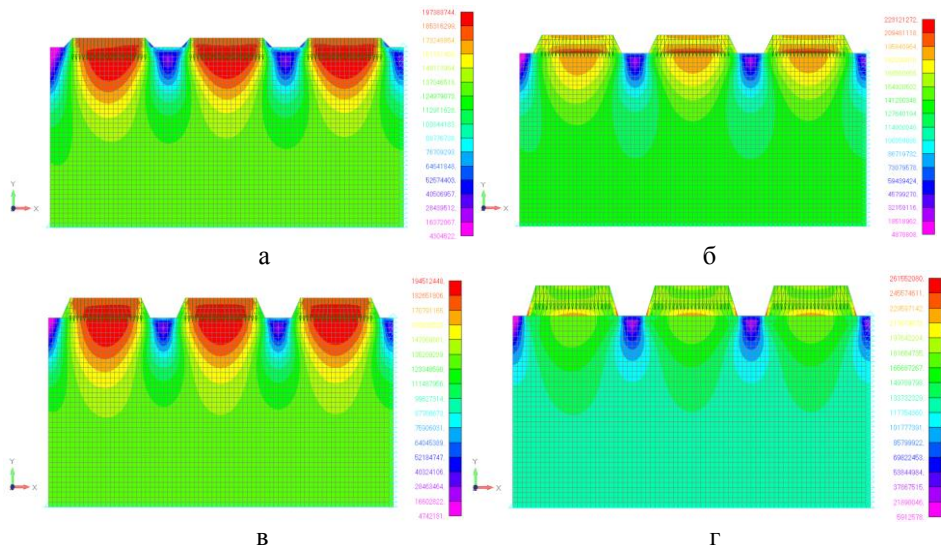


Рис. 5. Напружено-деформований стан композиції основа-покриття від дії нормального навантаження на дискретних ділянках: а, в - покриття з карбіду вольфраму ВК8 товщиною  $h = 0,00002$  м (200 мкм) і  $0,00003$  (300 мкм) та б, г - основа зі сталі 65Г.

Аналіз рис. 1-5 дозволяє зробити висновок, що при використанні електроіскрових покриттів змінної суцільності має місце характер зниження напружень, в порівнянні з суцільним електроіскровим покриттям.

Аналіз результатів чисельного моделювання на рис. 5-6 показує, що зі збільшенням товщини покриття напруження  $\sigma_3$  в основі в зоні між дискретами стають значнішими. Зі збільшення суцільності (зменшенням відстані між дискретами) зростає відповідно концентрація напружень  $\sigma_3$ .

Залежність напружень у всіх аналізованих характерних точках композиції основа-покриття від товщини (рис. 5-6) показано на рис. 7. Перетин графіка  $\sigma_2$  та  $\sigma_3$  свідчить про те, що для забезпечення адгезійної міцності покриття з основою при нормальному навантаженні необхідно дотримуватися співвідношення ширини покриття до його висоти як 1/12,5.

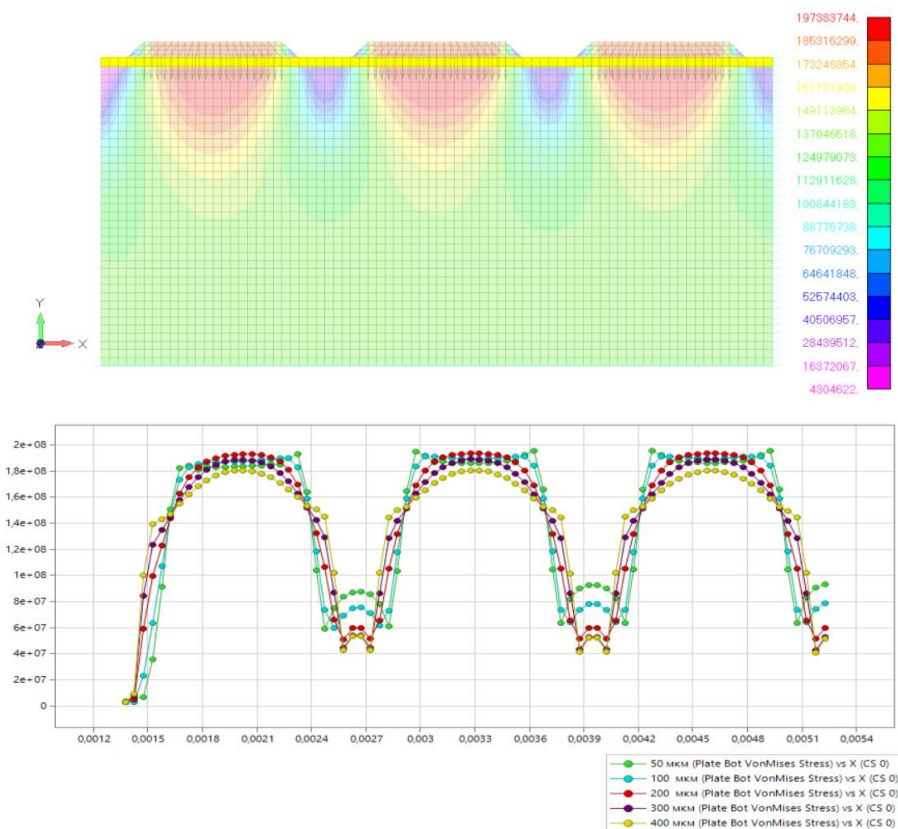


Рис. 6. Напружено-деформований стан композиції основа-покриття від дії нормального навантаження на дискретних ділянках в залежності від товщини покриття (товщина покриття  $h = 50 \dots 400$ мкм).

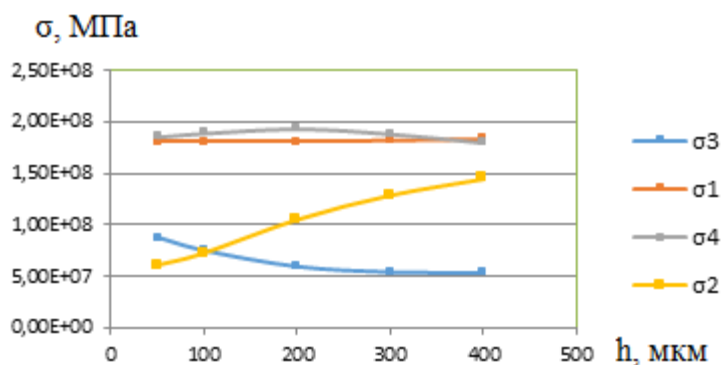


Рис. 7. Залежність еквівалентних напружень для зміцнювальної поверхні та покриття залежно від його товщини (товщина покриття  $h = 50 \dots 400$ мкм).

На рис. 8-9 представлений розподіл дотичних напружень  $\tau_{xy}$  по довжині зміцнювальної поверхні в залежності від товщини покриття (товщина покриття  $h = 50 \dots 400$ мкм).

Залежність напружень у всіх аналізованих характерних точках композиції «зміцнювальна поверхня-покриття» від товщини покриття (рис. 6, 8, 10) показано на рис. 7, 9, 10.

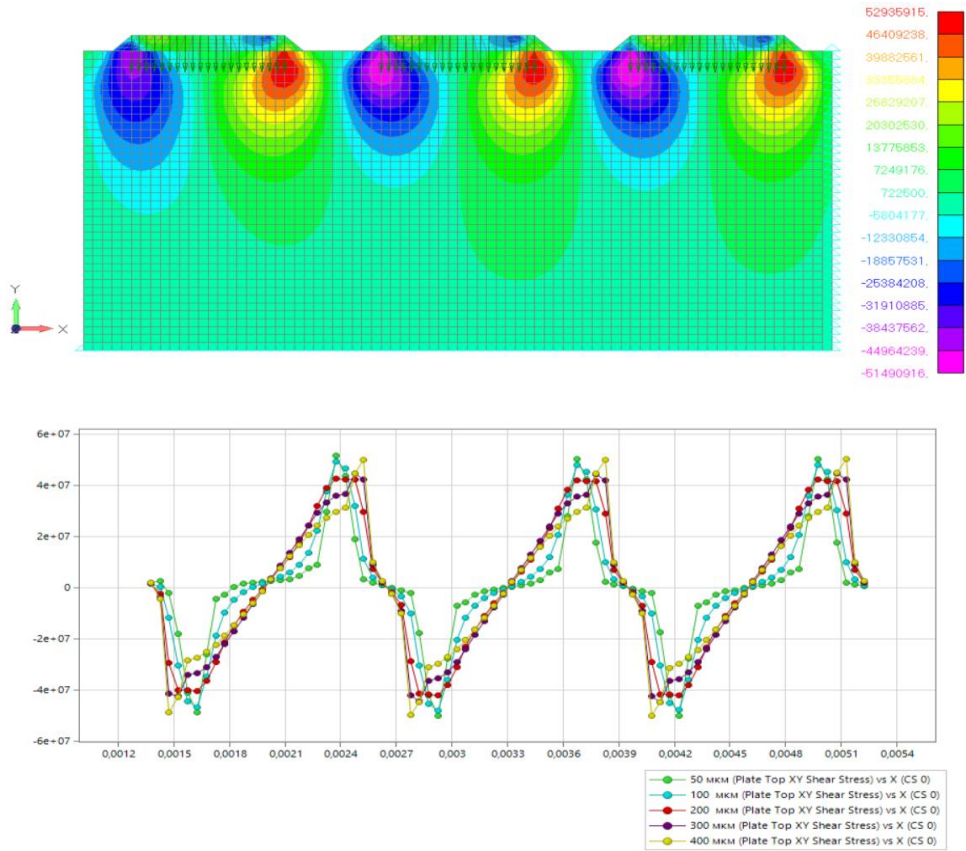


Рис. 8. Розподіл дотичних напружень  $\tau_{xy}$  по довжині зміцнювальної поверхні в залежності від товщині покриття (товщина покриття  $h = 50 \dots 400\mu\text{м}$ ).

$\sigma$ , МПа;  $\tau$ , МПа

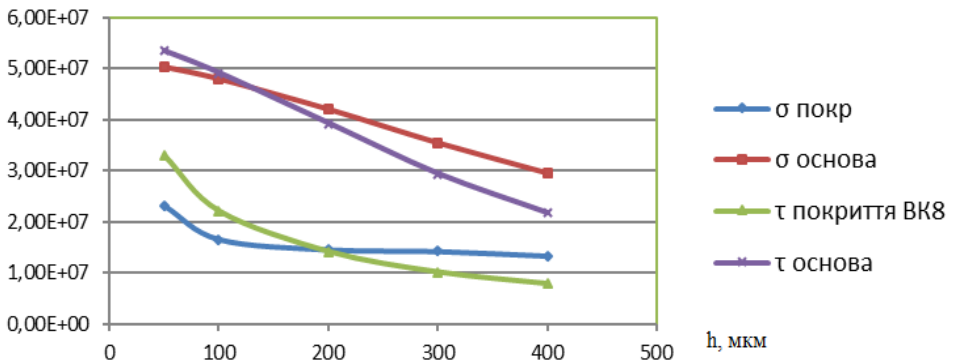


Рис. 9. Напружений стан в покритті та в основі в залежності від товщини покриття.



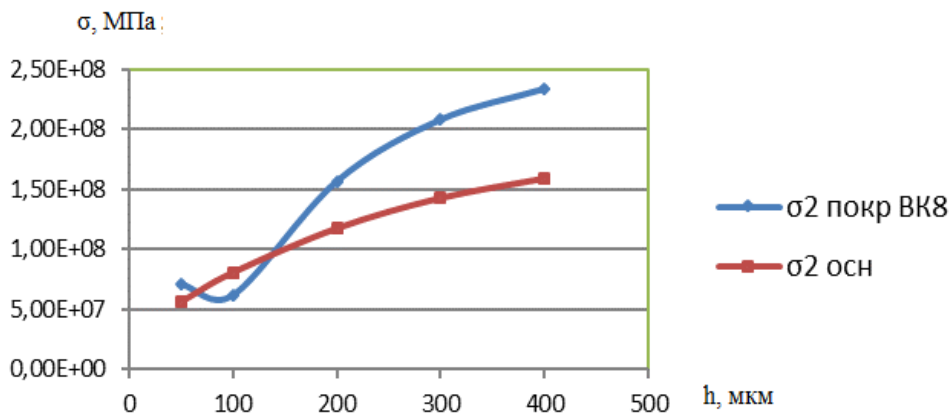


Рис. 10. Напружений стан в покpтiтi та в оснoвi в залежнoстi вiд товщини покpтiття.

Аналіз проведених досліджень дозволяє зробити висновок, що електроіскрові покpтtя доцiльно наносити товщиною 200 мкм. При оптимальнiй товщинi покpтtя 200 мкм електроіскрові композиційні покpтtя дозволяють вирiшити основне протирiччя, що виникає пiд час використання надтвердих поверхневих шарiв - подолати їх крихкiсть. У покpтtі товщиною 200 мкм змiнної суцiльностi, сформованому методом електроіскрового легування, забезпечується обмеження зростання напружень та процесу трiщиноутворення, що багаторазово пiдвищує його мiцнiсть i довговiчнiсть, повнiстю виключаючи когезiйне розтрiскування та адгезiйне вiдшарування.

Проектування дискретного покpтtя з оптимальним сiввiдношенням товщини i суцiльностi покpтtя дозволяє забезпечити стiйкiсть конструкцiй, що працюють в умовах високих контактних навантажень та тертя. Результати досліджень можна використовувати при розробцi технологiчних процесiв формування електроіскрових композиційних покpтtв змiнної суцiльностi при виготовленнi, змiцненнi та вiдновленнi робочих органiв i деталей сiльськогосподарських машин i технiки в цiлому з метою пiдвищення їхньої зносостiйкостi та термiну служби.

**Висновки.** Проаналiзовано напружено-деформований стан електроіскрових композиційних покpтtв дискретної структури та визначено, що дані покpтtя забезпечують поряд з адгезiйною мiцнiстю системи «змiцнювальна поверхня-покpтtя» мiнiмальний рiвень напружено-деформованого стану покpтtя, що позитивно вплине на експлуатацiйний стан покpтtя. Забезпечити високі експлуатацiйні характеристики змiцнювальної поверхнi можна шляхом вибору суцiльностi та товщини електроіскрових покpтtв, якi повинні забезпечувати мiнiмальні показники напружень як у шарі покpтtя, так i в площинi адгезiйного контакту основа-покpтtя. Оптимальні значення суцiльностi та товщини електроіскрових композиційних покpтtв вибираються за напружено-деформованим станом композицiї «змiцнювальна поверхня-покpтtя».

Параметри електроіскрових композиційних покpтtв визначали за напружено деформованим станом композицiї «змiцнювальна поверхня - покpтtя» Моделювання напружено-деформованого стану композицiї «змiцнювальна поверхня - покpтtя» проводили методом скiнченн-елементного

аналізу в ліцензованому програмному комплексі MSC VisualNastran for Windows 2003.

Електроіскрові композиційні покриття змінної суцільності оптимальною товщиною 200 мкм дозволяють вирішити основне питання, що виникає під час формування надтвердих зміцнювальних поверхневих шарів, - сформувані покриття, яке не буде характеризуватися крихкістю. У електроіскрових покриттях змінної суцільності забезпечується обмежене зростання напружень та процесу тріщиноутворення, що багаторазово підвищує його зносостійкість, міцність і довговічність, виключаючи когезійне розтріскування та адгезійне відшарування покриття.

### Список літератури

1. Ляшенко Б.А., Солових Є.К., Лопата Л.А., Підвищення міцності та довговічності деталей машин агропромислового комплексу багатофункціональними покриттями. *Механіка де формівного твердого тіла: доп. сесії Наукової ради з проблеми «Механіка де формівного твердого тіла» НАН України (15–16 жовт. 2008, Полтава)*. Полтава: 2008. С. 15-31.
2. Kharlamov Y., Mamuzi I., Lopata L. The selection and development of tribological coatings. *Materials and technology (Materiali in tehnologije)*, 44 (2010) 5, 283–287.
3. Мікосянчик О. О., Шамрай В. Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. 4 (97). С. 44-51
4. С.О. Лузан, О.І. Сідашенко, С.О. Лузан. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій. Харків, ХНТУСГ. 2020. 127 с.
5. Б.А. Ляшенко, В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, А.В. Рутковський Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль, ТДТУ ім. І. Пулюя*. 2004. С. 381-386.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2025.

**Шамрай Віталій Борисович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: [2825003@stud.nau.edu.ua](mailto:2825003@stud.nau.edu.ua) , <https://orcid.org/0000-0002-1746-5213>

---

---

V. SHAMRAI

### ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIGHTENING STATE OF SURFACES WITH COMPOSITE COATINGS FORMED BY THE ELECTRO-SPARK DOPING METHOD

The results of the assessment of the stress-strain state of surfaces with composite coatings formed by the method of electric spark alloying are presented, which made it possible to choose the optimal variant of the surface design, the coating application process modes and the composition of the composite material. The parameters of electrospark composite coatings were determined by the stressed-deformed state of the composition "reinforcing surface - coating". Modeling of the stressed-deformed state of the composition "reinforcing surface - coating" was carried out by the method of finite element analysis in the licensed software package MSC VisualNastran for Windows 2003. The conducted studies of composite electric spark coatings of variable continuity showed that coatings with a continuity of 70...90% have much lower microstresses than coatings applied in a continuous layer. The conducted studies showed that by changing the continuity and thickness of the coating, as well as by selecting a range of materials according to their physical and mechanical characteristics, it is possible to minimize the stress-strain state of the surfaces to be strengthened and control it. Variable continuity electrospark composite coatings with an optimal thickness of 200 microns allow solving the main issue that arises during the formation of superhard strengthening surface layers - to form a coating that will not be characterized by brittleness. Variable continuity electrospark coatings provide limited stress growth and the process of crack formation, which significantly increases its wear resistance, strength and durability, eliminating cohesive cracking and adhesive delamination of the coating.

**Key words:** electrospark alloying, wear resistance, stress-strain state, composite coatings.

#### References

1. Liashenko B.A., Solovykh Ye.K., Lopata L.A. Pidvyshchennia mitsnosti ta dovhovichnosti detalei mashyn ahropromyslovoho kompleksu bahatofunktionalnymy pokryttiamy. *Mekhanika de formivnoho tverdoho tila: dop. sesii Naukovoï rady z problemy «Mekhanika de formivnoho tverdoho tila»* NAN Ukrainy (15–16 zhovt. 2008, Poltava). Poltava: 2008. S. 15-31.
2. Kharlamov Y. Mamuzi I., Lopata L. The selection and development of tribological coatings. *Materials and technology (Materiali in tehnologije)*, 44 (2010) 5, 283–287.
3. Mikosianchuk O. O., Shamrai V. B. Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei detalei silskohospodarskoi tekhniki kompozytsiinykh pokryttiamy. *Problemy tertia ta znoshuvannia*. 2022. 4 (97). S. 44-51
4. S.O. Luzan, O.I. Sidashenko, S.O. Luzan. Obgruntuvannia ta vdoskonalennia tekhnolohii vidnovlennia detalei. Kurs lektsii. Kharkiv, KhNTUSH. 2020. 127 s.
5. B.A. Liashenko, V.S. Antoniuk, O.B. Soroka, A.V. Rutkovskiy Rozrobka novykh znosostiikykh pokryttiv dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk detalei mekhanizmiv. *Dynamika, mitsnist i nadiinist silskohospodarskykh mashyn: mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Ternopil, TDTU im. I. Puliuia*. 2004. S. 381-386.

**Vitaliy Shamrai** - graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: [2825003@stud.nau.edu.ua](mailto:2825003@stud.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-1746-5213>