

### **Література**

1. Пат. 77321 Україна, МКИ 7F16C33/14. Спосіб виготовлення поверхонь тертя / Антонюк В.С., Вовк В.Д., Возненко В.В., Пономаренко А.І., Старицький Л.П., Цирук В.Г.; Укр. – № а 2005 00396; Заявл. 17.01.2005. Опубл. 15.09.2006. Бюл. №11. – 8 с.
2. Антонюк В.С., Возненко В.В Вплив дискретно-орієнтованої топографії поверхні деталей на їх трибологічні характеристики // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. – К.: НТУУ “КПІ”, 2006. – Вип. 32. – С.71-76.
3. Возненко В.В. Підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь пари тертя // Вісник НТУУ „КПІ”. Приладобудування – 2003. – К.: НТУУ “КПІ”, 2003. – Вип. 26. – С.73-81.
4. Трение, изнашивание и смазка. Справочник: В 2-х кн. Кн.1 / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина.– М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
5. Изучение маслосмачности поверхностей с регулярным микрорельефом / Наливайко В.М., Шепеленко И.В., Русских В., Онша Ю., Якименко С. // Проблемы трибологии. –2001.– №2.– С.34-39.

Антонюк В.С., Вовк В.Д., Возненко В.В. **Повышение работоспособности рабочих поверхностей деталей движущихся узлов.**  
Рассмотрен метод повышения работоспособности движущихся деталей узлов путем формирования на их рабочих поверхностях рельефа с дискретно-ориентированной топографией. Предложено выбор конструкционных параметров рабочих поверхностей, таких как сплошность та глубина лунок, их размеры та форму определять с учетом условий эксплуатации, что обеспечит благоприятный баланс антифрикционности поверхности и ее несущую способность.

Antoniuk V.S., Vovk V.D., Voznenko V.V. **Increasing of efficiency of working surfaces for moving details of units.**  
Method to increase efficiency for moving details of units by means of formation of discontinuous relief on the working surfaces is observed. It is suggested to choose parameters of the working surfaces such as continuousness, depth, size and shape of dimples taking into account operation conditions. This will ensure right balance of antifricition characteristics of surface and its load-carrying ability.

*Надійшла до редакції  
22 січня 2007 року*

УДК 621.9.02.004.6(048)

## **ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНО-МОДИФІКОВАНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОВЕРХОНЬ**

*Сорока О.Б., Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України,  
м. Київ, Україна*

*Розглянуто підходи до встановлення конструкційних параметрів зносостійкого дискретного поверхневого шару, таких як: розмір, щільність та конфігурації вільної кромки покриття. Показано, що вибір цих параметрів залежить від типу модифікованої поверхні і умов експлуатації деталей та інструментів. В основу визначення конструкційних параметрів зміцненої поверхні покладено мінімізацію напруженого стану та умови деформування в системі «основа-покриття»*

### **Вступ**

Серед механічних характеристик деталей, машин та приладів велика кількість залежить від властивостей поверхневих шарів. З метою зміцнення поверхні застосовують різні методи, серед яких все більше розповсюдження набувають такі, що дозволяють формувати поверхневі зони дискретного типу. Формування зміцнених зон реалізується за допомогою висококонцентрованих

джерел нагрівання лазерним променем або плазмовим струменем [1], а також методом електроіскрового легування. Такі методи є дискретними за своєю природою і дозволяють поєднувати зносостійкість і твердість зміцнених ділянок з підвищеною пластичністю незміцнених зон. цей же принцип застосовується при створенні сучасних наноструктурних композицій, які представляють собою нанокристалічні зерна матеріалу покриття, що занурені в аморфну матрицю.

Більшість покриттів, які наносяться різними методами, зокрема методом фізичного осадження, традиційно формуються як суцільні. Але модернізація устаткування для нанесення покриттів, дозволяє отримувати вакуум-плазмові покриття дискретного типу [2]. Окрім поєднання в системі «основа-покриття дискретного типу» таких, на перший погляд, взаємовиключних параметрів як твердість і пластичність, ці композиції є досить стійкими до когезійного розтріскування та адгезійного відшарування при різних видах термосилового навантаження [3]. Використати повною мірою переваги дискретних покриттів можна, якщо правильно обрати такі параметри поверхневого шару, як щільність покриття (зміцнених ділянок), їх розміри та форми.

**Метою роботи** є аналіз підходів до визначення параметрів зносостійкого поверхневого шару. Вочевидь, в основу вибору параметрів зміцненої поверхні слід покласти мінімізацію напружено-деформованого стану в системі «основа-покриття».

### Забезпечення когезійної міцності

Організація дискретного шару з розміром ділянки  $D_{\max}$  ідентичного тому, який виникнув би при розтріскуванні з кроком  $C$  покриття в умовах зовнішнього силового навантаження основи  $P$  (рис.1) та температурного навантаження, що спричиняє напруження в покритті  $\sigma_i^T$ , дозволяє запобігти когезійному руйнуванню покриттів [4].

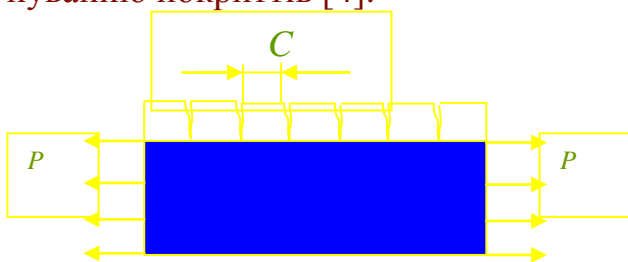


Рисунок 1 – Схема тріщин в покритті під дією експлуатаційного навантаження  $P$

Максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття визначали як:

$$D_{\max} \leq C_n = -\frac{1}{k} \ln \left( 0,1 + \frac{\sigma_i^{\dot{\delta}} + \sigma_n^{\zeta \dot{\delta} \ddot{\epsilon}}}{\varepsilon_{k\delta} E_n} \cdot \left( 1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o} \right) \right) \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{kp}$  – критична деформація основи, за перевищенням якої починається когезійне розтріскування;  $H_o$  - напівтовщина основи;  $h_n$  – товщина покриття;  $E_o$ ,  $E_n$  – модулі пружності основи і покриття;  $k$  - коефіцієнт, який залежить від модулів пружності основи і покриття.

При цьому, при визначенні кроку тріщини враховуються, крім експлуатаційних, залишкові напруження  $\sigma_i^{\zeta \dot{\delta} \ddot{\epsilon}}$  в покритті.

Аналіз виразу (1), а також результати експериментальних досліджень показують, що покриття, яким притаманні залишкові напруження стиску, є стійкими до когезійного розтріскування.

### Забезпечення адгезійної міцності

Саме значним рівнем залишкових напружень стиску пояснюють високу зносостійкість поверхонь з вакуум-плазмовими покриттями. Водночас, значний рівень залишкових напружень стиску може призводити до адгезійного відшарування покриття внаслідок втрати стійкості елементом покриття ще до початку його експлуатації. Обмеження розміру ділянки, як елемента в умовах поперемного гнуття, дозволяє запобігти втраті адгезійного зв'язку [5].

Розглядаючи елемент покриття (рис.2) у вигляді стрічки одиничної ширини висотою  $h$  і довжиною  $l$ , пов'язаною силою адгезійного зчеплення з основою  $T$ , на яку діють сили стиску, обумовлені залишковими напруженнями  $\sigma_i^{\zeta\hat{a}\hat{e}}$ , отримано рівняння суми моментів сил відносно точки на осі шару покриття:

$$E_n I \frac{d^2 y}{dx^2} = -\sigma_i^{\zeta\hat{a}\hat{e}} h \left( y + \frac{h}{2} \right) - T(x - x_0) + Rx + M, \quad (2)$$

де  $E_n$  – модуль пружності покриття,  $I$  – осьовий момент інерції поперечного перерізу покриття.

Розв'язання диференційного рівняння 2 дозволяє визначити довжину ділянки  $l$  як функцію залишкових напружень, товщини та модуля пружності покриття, а також сили адгезійного зчеплення.

Адгезійне відшарування від основи може також відбуватися шляхом нормального відриву при навантаженні поверхні з покриттям зосередженою силою  $P$ .

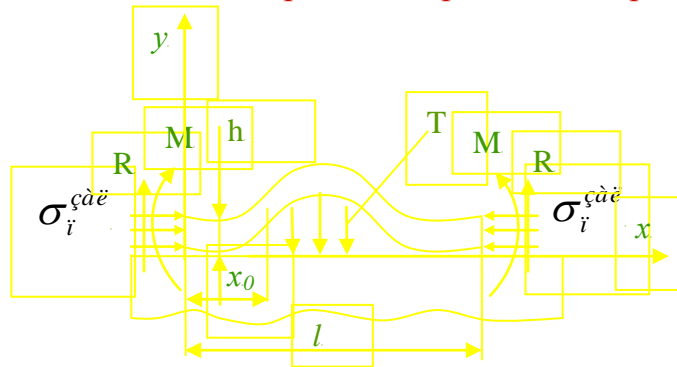


Рисунок 2 – Адгезійне відшарування внаслідок втрати стійкості елементом покриття під дією залишкових напружень стиску

Розглядаючи дискретну ділянку покриття як балку на пружній основі, розв'язували задачу розрахунку прогину цієї ділянки [7]. Елемент електроіскрового покриття (включення) розглядали як балку з жорстко затиснутими кінцями (рис.3а), а дискретну ділянку вакуум-плазмового покриття – як балку з вільними кінцями (рис.3б).

Приймали гіпотезу Фуса-Вінклера про пропорційну залежність між реакцією і прогином балки  $w(x)$  з коефіцієнтом пропорційності  $\alpha$ , який дорівнює мо-

дулю пружності основи, і розв'язували диференціальне рівняння пружної лінії для балки:

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} + \frac{4}{L^4} w(x) = 0 \quad (4)$$

де  $L = \sqrt[4]{\frac{4E_n I}{\alpha}}$ ;  $E_n$  – модуль пружності матеріалу покриття;  $I$  – момент інерції перерізу балки відносно осі  $Y$ .

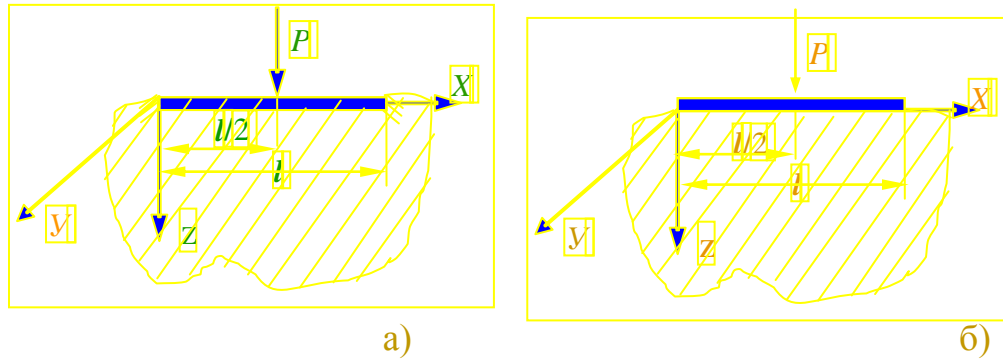


Рисунок 3 – Схема дискретної ділянки електроіскрового покриття (а) та вакуум-плазмового покриття (б) під дією навантаження зосередженою силою  $P$

Внаслідок інтегрування рівняння методу початкових параметрів для прогинів  $w(x)$  ділянки покриття з урахуванням граничних умов через функції Крилова для електроіскрового покриття отримали у вигляді:

$$w(x) = -\frac{1}{E_n I} \left\{ M_0 L^3 Y_3 \left( \frac{x}{L} \right) + Q_0 L^3 Y_4 \left( \frac{x}{L} \right) - L^3 P Y_4 \left( \frac{x-l/2}{L} \right) \right\}, \quad (5)$$

а для вакуум-плазмового - у вигляді:

$$w(x) = w_0 Y_1 \left( \frac{x}{L} \right) + \theta_0 Y_2 \left( \frac{x}{L} \right) + \frac{L^3}{E_n I} P Y_4 \left( \frac{x - \frac{l}{2}}{L} \right), \quad (6)$$

де  $M_0$  і  $Q_0$  – згинальний момент та перерізуюча сила в початку координат,

$w_0, \theta_0$  – прогин та кут повороту в початку координат;

$Y_1, Y_2, Y_3$  і  $Y_4$  – функції А.Н.Крилова.

Для визначення параметрів електроіскрового покриття проводили розрахунки для твердого сплаву ВК8 ( $E_n = 7,1 \cdot 10^5$  МПа), який нанесено на швидкорізальну сталь Р6М5 ( $E_o = 2,2 \cdot 10^5$  МПа). Параметри вакуум-плазмового покриття визначали на прикладі розрахунку покриття TiN ( $E_n = 4,4 \cdot 10^5$  МПа), який нанесено на титанову основу ВТ3-1 ( $E_o = 1,1 \cdot 10^5$  МПа).

Аналіз отриманих результатів (рис.4, 5) дозволяє зробити висновок, що існує співвідношення між довжиною ( $l$ ) та товщиною ( $h$ ) дискретної ділянки, нижче якого покриття по всій довжині під дією зосередженої сили  $P$  набуває додатного прогину: “вдавлюється” в основу, і адгезійне відшарування не настає. Для електроіскрового покриття ВК8 на Р6М5 це співвідношення становить  $l \leq 7h$ , а для TiN на титановому сплаві –  $l \leq 3,5h$ . Для довжини ділянки ВК8 –  $l >$

7h та ділянки TiN -  $l > 3,5h$  спостерігаються зони з від'ємним прогином, для яких ймовірним є адгезійне відшарування покриття від основи.

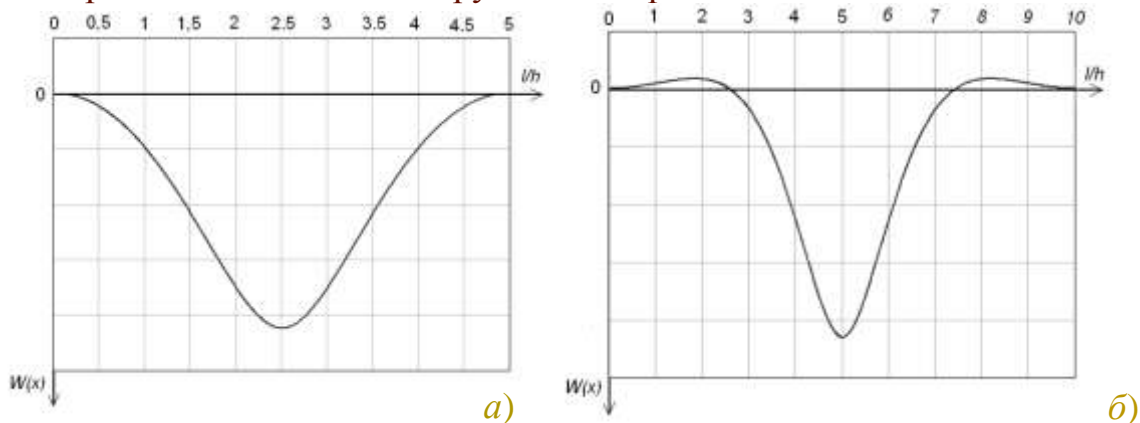


Рисунок 4 – Форми прогину дискретних ділянок покриття ВК8 з різним співвідношенням  $l/h$  під дією сили  $P$ , де  $l/h = 5$  (а);  $l/h = 10$  (б)

Адгезійне відшарування може відбуватися також зсувом в зоні адгезійного контакту від дії дотичних напружень, які виникають при експлуатації деталі або інструменту з покриттям. Застосування для розрахунку напружено-деформованого стану системи “основа-покриття” методу скінчених елементів дозволяє встановити залежність дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту в умовах розподіленого контактного навантаження від розмірів дискретної ділянки  $D$  [7]. Значення дотичного напруження на поверхні адгезійного контакту вакуум-плазмового покриття з основою спочатку збільшуються із зростанням дискретної ділянки, а потім, досягнувши максимуму, починають зменшуватись.

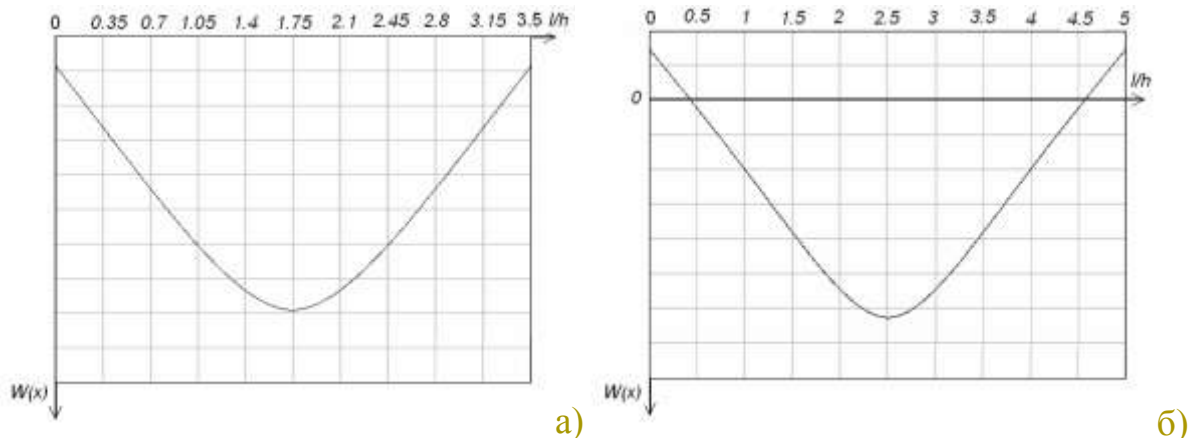


Рисунок 5 – Форми прогину дискретних ділянок покриття TiN з різним співвідношенням  $l/h$  під дією сили  $P$ , де  $l/h = 3,5$  (а);  $l/h = 5$  (б)

Як показали розрахунки що оптимальні значення розмірів дискретної ділянки  $D$  покриття (Ti,Al)N на твердому сплаві Т15К6 знаходяться в межах 50-80 мкм при його товщині 6-10 мкм.

### Визначення оптимальної конфігурації кромки ділянок покриття

Існують також спроби визначення оптимальної конфігурації кромки ділянок покриття. Розв'язуючи задачу теорії пружності для системи “основа-покриття”,

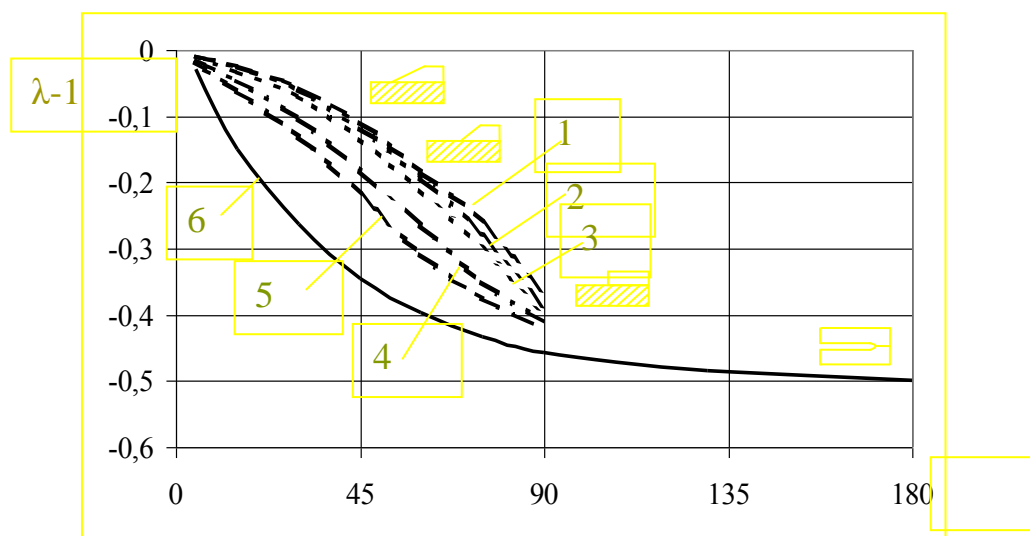
отримано залежності коефіцієнту сингулярності полів напружень та деформацій від співвідношення пружних характеристик і конфігурації вільного краю покриття [8]. Залежність показника сингулярності  $\lambda-1$  від кута вільної кромки покриття  $\theta$  відносно поверхні основи з сталі 12Х18Н10Т представлено на рис 6. Залежності показника сингулярності, зображені кривими (1–5), відповідають різним конфігураціям покриття та співвідношенням пружних констант основи і плазмових покриттів (табл.1), а крива 6 відтворює випадок однакових пружних характеристик покриття і основи.

Із зменшенням кута  $\theta$  сингулярність полів напружень зменшується і наближається до нуля при  $\theta \rightarrow 0$ . Отже, чим менше кут нахилу вільної кромки покриття до основи, тим менше концентрація напружень в системі “основа-покриття”.

### Визначення кроку розташування зміцнених зон та щільності дискретно-модифікованої поверхні

При формуванні дискретного шару з чергуванням зміцнених твердих і неzmцнених м'яких ділянок методом плазмового зміцнення глибина та ширина зони визначаються самою технологією зміцнення. Так, плазмова обробка чавуну викликає утворення зміцненої зони плазмового впливу у формі сегмента кола глибиною 2,4...3,4 мм та 8...12 мм завширшки [9].

Крок розташування зміцнених зон (розмір відносно пластичного міждискретного проміжку) пропонується обирати з умови мінімального рівня напружень в цій зоні.



1 – 5 відповідають різним конфігураціям покриття і співвідношенням пружних констант основи і плазмових покриттів; 6 – пружні властивості покриття і основи – однакові

Рисунок 6 – Залежність показника сингулярності ( $\lambda-1$ ) від кута  $\theta$

Розглядаючи поверхню чавуна із зміцненими ділянками під дією контактного навантаження на основі аналізу результатів чисельних розрахунків напружено-деформованого стану за методом скінчених елементів показано, що збільшення ширини пластичної зони від 1-2 мм до 4-5 мм при ширині зміцненої зони 10 мм супроводжується зменшенням еквівалентних напружень в цій зоні, а подальше

збільшення між зміцненими ділянками не призводить до мінімізації напружено-деформованого стану. Отримані чисельні результати узгоджуються з експериментальними даними експлуатації валків для подрібнення зерна з високоміцного чавуну, які свідчать про те, що оптимальне співвідношення зносостійкості та тріщиностійкості спостерігається в разі, коли відстань між зміцненими зонами становить половину їх ширини [10].

Таблиця 1

№ покриття	Матеріал покриття (основи)	Модуль пружності E, ГПа	Коефіцієнт Пуасона, $\mu$
1	$(MgAl_2O_4+30\%Al_2O_3)+50\%NiCr$	71	0,21
2	$Al_2O_3$	33	0,27
3	$Dy_2O_3+18\%TiO_2$	38	0,25
4	$Dy_2O_3+25\%Mo$	58	0,22
5	$Y_2O_3$	37	0,24
основа	12X18H10T	210	0,28

Щільність вакуум-плазмового покриття пропонується [11] визначати з умови того, що еквівалентне напруження на поверхні контакту з покриттям від дії зовнішнього навантаження та залишкових напружень для покриттів дискретної структури повинно бути меншим, ніж допустиме напруження при стисканні для матеріалу покриття:

$$\frac{\sigma_{n_{екв}} k_1(D,h)}{\psi} \leq [q_n], \quad (7)$$

де  $\sigma_{n_{екв}}$  – еквівалентні напруження на поверхні суцільного покриття від дії зовнішнього контактного та дотичного навантаження та залишкових напружень в суцільному покритті;  $k_1(D,h)$  – коефіцієнт, що показує частку, яку становлять залишкові напруження в покритті дискретної структури заданого розміру ( $D$ ) і товщини ( $h$ ) відносно залишкових напружень в суцільному покритті;  $\psi$  - щільність дискретного покриття;  $[q_n]$  – допустиме напруження при стисканні для матеріалу покриття.

Експериментальні дослідження процесу різання сталі ШХ15 інструментом з твердого сплаву Т15К6 з покриттями (Ti,Al)N суцільного та дискретного типу різної щільності з розміром ділянки  $D= 80$  мкм та товщиною 6 мкм показали, що стійкість інструмента з покриттям дискретного типу підвищилась в 1,4 рази порівняно з інструментом з суцільними покриттями. При цьому, існує діапазон оптимальної щільності (58-60%), який відповідає максимальній стійкості інструмента.

### Висновки

Існує декілька підходів до визначення конструкційних параметрів зносостійкого поверхневого шару. Показано, що забезпечити міцність поверхні деталей та інструментів, а також їх працездатність можливо формуванням зміцнених зон дискретного типу з визначеними параметрами. Вибір конструкційних параметрів залежить від типу модифікованої поверхні та умов експлуатації, що

є перспективним напрямком досліджень. В основу вибору параметрів зміцненої поверхні покладено мінімізацію напруженого стану та умови деформування в системі «основа-покриття».

**Література**

1. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // Сучасне машинобудування. – 1999.– №1.– С. 94–104.
2. Патент України № 68303 МПК С23 С14/32 Спосіб нанесення зносостійких несущільних покриттів / Рутковський В.А., Антонюк В.С., Волкогон В.М., Ляшенко Б, А., Осипов О.С., Петруша І.А – Заявл. 03.12.2003. Опубл. 15.07.2004. – Бюл. № 7.
3. Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы. 2001, № 4 (10).-С.17-25.
4. Антонюк В.С., Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б. Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005.– № 3. – С. 49-50.
5. Ляшенко Б.А., Ришин В.В., Шаривкер С.Ю., Зильберберг В.Г., Жук А. П. К анализу напряженного состояния покрытий // Жаростойкие и теплостойкие покрытия: Труды 4-го всесоюзного совещания . - Л.:Наука. - 1969. - С.454-456.
6. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Панівко В.В. Розрахунковий метод визначення параметрів зносостійкого покриття // Вісник СумДУ, №11 (83)' 2005 – С.13 –18.
7. Антонюк В.С., Сорока О.Б. Архітектура зміцненої поверхні різального інструменту // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. науч.-техн. сборник. - X: НТУ “ХПИ”, 2006, Вып.70. - С. 26 – 31.
8. Долгов Н.А., Сорока Е.Б. Сингулярность полей напряжений в системе основа-покрытие // Пробл. прочн. – 2004. - № 6. - С. 119-127.
- 9.Сорока О.Б., Калініченко В.І., Самотугіна Ю. Оптимізація параметрів дискретної структури при плазмовому гартуванні інструментальних матеріалів // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів, 2006. - Т.1.- С.164-167.
10. Самотугин С.С.,Малинов Л.С., Самотугина Ю.С., Ляшенко Б.А. Повышение износостойкости чугуновых деталей дифференцированной (дискретной) плазменной обработкой // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы международной научно-технической конференции.- К.: АТМ Украины. – 2002. – С.158-161.
11. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. Дискретні покриття на різальному інструменті // Пробл. прочности. – 2007. - №1. – С. 138-143.

<p><b>Сорока Е.Б. Выбор параметров дискретно-модифицированных износостойких поверхностей</b>          Рассмотрены подходы к установлению конструкционных параметров износостойкого дискретного поверхностного слоя, таких как: размер, сплошность и конфигурация свободной кромки покрытия. Показано, что выбор этих параметров зависит от типа модифицированной поверхности и условий эксплуатации деталей и инструмента. В основу определения конструкционных параметров упрочненной поверхности положена минимизация напряженного состояния и условия деформирования в системе «основа-покрытие».</p>	<p><b>Soroka O.B. Choice of the parameters of the modified wear-resistant surfaces</b>          Methods to determine constructive parameters for wear-resistant layer such as: size, continuousness and free edge shape are observed. It is shown that choice of these parameters depends on the type of modified surface and exploitation conditions. The basic principles to determine constructive parameters for wear-resistant surface are minimization of Stress State and conditions of straining in the composition “substrate-coating”.</p>
--	--

*Надійшла до редакції  
5 лютого 2007 року*