

**Попов С.М.,  
Антонюк Д.А.**

Запорізький національний  
технічний університет,  
м. Запоріжжя, Україна  
**E-mail:** oasd@mail.ru, spopov@zntu.edu.ua

**АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ  
ГЕОМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ТВЕРДОЇ  
ФАЗИ ЗНОСОСТІЙКИХ СПЛАВІВ  
В УМОВАХ КОНТАКТУ  
ІЗ ЗАКРІПЛЕНИМ АБРАЗИВОМ**

УДК 669.018.25

В роботі модернізовано та адаптовано аналітичну модель до умов зношування закріпленим абразивом, встановлено оптимальні геометричні співвідношення між абразивними частками та зміцнювальною фазою. Подано аналіз комплексного впливу кількості, типу та розміру зміцнювальної фази гетерогенних сплавів на їх зносостійкість.

**Ключові слова:** гетерогенний сплав, зносостійкість, зміцнювальна фаза, абразивне зношування.

**Вступ**

Абразивне зношування, як процес руйнування поверхонь тертя пов'язано з роботою практично всіх деталей та робочих органів дорожньої, будівельної, гірничої, землеробної техніки та обладнання. При цьому з'ясовано, що контактна взаємодія металу із закріпленими абразивними зернами у порівнянні з незакріпленими зернами, має максимальну інтенсивність зношування, що обумовлює необхідність більш детального вивчення схеми контакту та зокрема геометричних співвідношень між формою, розмірами абразивних часток та зміцнювальною твердою фазою сплавів.

Насамперед, це пов'язано з тим що, при контакті поверхні металу в умовах закріпленого абразиву висока зносостійкість, визначається комплексом оптимальних співвідношень і взаємозв'язків між фізико-механічними властивостями такими як агрегатна твердість сполучена з достатньою міцністю та технологічною здатністю сплавів (кількість холодних тріщин), які вагомою мірою залежать від наявності в їх структурі зміцнювальної фази, зокрема її кількості, типу та розміру. Так дослідження мікроструктури поверхонь тертя сплавів після взаємодії з абразивом [1 - 4] доводить, що вони виступають своєрідним «бар'єром» на шляху руху абразивної частки, та в деяких випадках спроможні її руйнувати та подрібнювати. При цьому, конче важливим є і розуміння того, що надмірна кількість й розміри, чи щільність розташування твердих вкраплень (карбідів, боридів, карбоборидів, борокарбідів та інших хімічних сполук які використовують для зміцнення матеріалу) у основі провокує їх подальше викришування зі структури матриці металу або створюють умови для утворення та розвитку холодних тріщин, особливо на етапі технологічного процесу нанесення зносостійкого шару покриття чи кристалізації та охолодження гетерогенного сплаву. Тому задача розробки алгоритмів та аналітичних моделей розрахунку геометричних складових твердої фази зносостійких сплавів в умовах контакту із закріпленим абразивом надасть можливість прогнозування оптимальної кількості, типу зміцнювальної фази (з можливим урахуванням її просторового розташування), що кристалізується в сплавах різних систем легування, а у загальному підсумку дозволить отримати кількісну оцінку їх інтенсивності руйнування в залежності від трибологічних і триботехнічних чинників конкретних умов спрацювання.

Кількість зміцнювальної фази зносостійкого гетерогенного сплаву, а також здатність матриці утримувати її, визначається вихідним хімічним складом матеріалу, температурними режимами, що використовуються під час отримання цих матеріалів [1, 2]. Варіювання кількісним складом, розміром і розподілом зміцнювальної фази можливе також за рахунок легування та модифікування азотом, титаном, ніобієм й іншими елементами [1, 3]. Використання технологічних прийомів, які дозволяють мінімізувати тепловкладення чи регулювати швидкість охолодження, також забезпечує зміну кількості та просторового розташування твердих включень [4].

Особливу увагу під час прогнозування зносостійкості сплавів слід приділити комплексному аналізу кількості зміцнювальної фази та її типу. Зокрема, значна кількість тонких і довгих включень пластинчастої форми (наприклад, карбіди хрому  $Cr_2_3C_6$ , рис. 1, а; карбіди кремнію SiC) не здатна протистояти абразиву при зіткненні [1, 3, 5, 6]. Карбіди розтріскуються та видаляються зі зрізаною матрицею, залишаючи канавки, прокреслені абразивом, і рвані кромки. Помітну здатність опиратися зношуванню мають карбіди ромбоподібної [3, 4, 7] (VC, див. рис. 1, д), квадратовподібної [3] (NbC), сфероподібної [3, 8, 9] (TiC, див. рис. 1, е) і розеткової [1, 4] ( $W_2C$ , див. рис. 1, ж; WC, див. рис. 1, з) форми, які мають високі фізико-механічні характеристики (VC:  $H_\mu = 25$  ГПа,  $\sigma_{cm} = 62$  МПа; NbC:  $H_\mu = 20,5$  ГПа,  $\sigma_{cm} = 2423$  МПа; TiC:  $H_\mu = 32$  ГПа,  $\sigma_{cm} = 138$  МПа).

Позитивний вплив твердих включень на зносостійкість гетерогенних сплавів фіксується за наявності 10 - 60 % зміцнювальної фази у вигляді боридів ( $M_2B$ , див. рис. 1, в, г) і карбоборидів ( $(M_7(CB))_3$ ,

$M(BC)$ ,  $M_2(BC)$ ,  $M_2(CB)$ ) [1, 3, 4, 8]. Зокрема з'єднання  $TiB_2$ ,  $FeB_2$ ,  $Mo_2B$  мають підвищену стійкість до руйнування абразивною часткою навіть з можливістю збільшення зміцнювальної фази до 80 - 90 %. Відмічається [1], що за масової частки вуглецю  $> 1,5\%$  і відношення  $B/C = 1,2$ , в наплавленому металі утворюється карбоборид  $M_{23}(CB)_6$ , який має меншу зносостійкість, ніж  $M_2(BC)$ , що з'являється за масової частки бору  $> 2\%$ . За малого вмісту бору (до  $1,5\%$ ) та високої масової частки вуглецю (близько  $2,1 - 2,6\%$ ) кристалізується карбід  $M_7C_3$  [1, 10]. Збільшення кількості бору ( $> 2\%$ ) в наплавленому металі призводить до утворення карбобориду  $M(BC)$ . Тому максимальна зносостійкість сплавів в умовах абразивного зношування досягається завдяки кристалізації зміцнювальної фази у вигляді карбідів боридів і карбоборидів витягнутої прямокутної, розеткової чи багатокутної форми. Отже, варіювання типом, кількістю та розмірами зміцнювальної фази дозволяє керувати зносостійкістю сплавів.

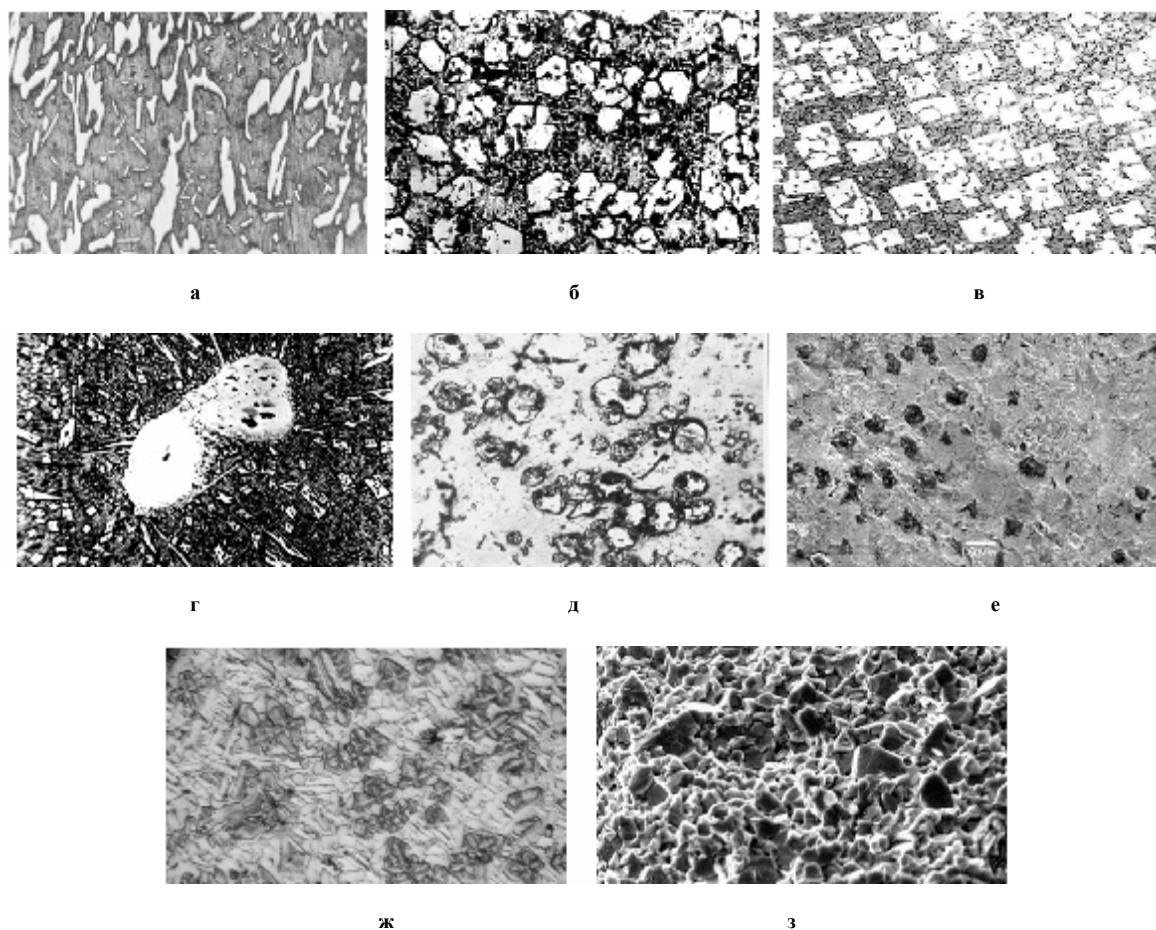


Рис. 1 – Мікроструктури сталей і сплавів із вмістом зміцнювальної фази різного типу:  
 а –  $Cr_{23}C_6$ ,  $\times 300$ ; б –  $Cr_7C_3$ ,  $\times 300$ ; в –  $CrB_2$ ,  $\times 300$ ;  
 г –  $CrB_4$ ,  $\times 200$ ; д –  $VC$ ,  $\times 500$ ; е –  $TiC$ ,  $\times 1000$ ;  
 ж –  $W_2C$ ,  $\times 3500$ ; з –  $WC$ ,  $\times 300$

### Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є теоретико-аналітичне прогнозування оптимальної кількості, типу зміцнювальної фази (з можливим урахуванням її просторового розташування), що кристалізується в сплавах різних систем легування. Задача наукового дослідження є розробка алгоритмів та аналіз аналітичних моделей розрахунку геометричних складових твердої фази зносостійких гетерогенних сплавів в умовах контакту із закріпленим абразивом та отримати кількісну оцінку інтенсивності руйнування в залежності від трибологічних і триботехнічних чинників конкретних умов спрацювання.

### Виклад матеріалів досліджень

Оптимальне співвідношення матриці та зміцнювальної фази, її кількість визначали виходячи з удосконаленої графоаналітичної моделі зношування [11]. Модель була доопрацьована та адаптована до умов взаємодії гетерогенного сплаву *Б*, рис. 2, (нанесений на поверхню робочого органу *В*, що рухається

під кутом  $\alpha$ ) з асфальтобетоном  $A$ , в якому закріплені абразивні частки граніту  $\Gamma$ . В розрахунках використана округла форма зміцнювальної фази, яка дозволила спрощено змоделювати механізм її взаємодії із закріпленим абразивом наступним чином. У гетерогенному зносостійкому сплаві  $B$  (рис. 2) зміцнювальна фаза у вигляді часток округлої (I) або багатокутної форми знаходиться в матриці (II). Твірна робочого інструменту проходить крізь лінію 1 - 2 (рис. 2). Аналіз відбитків на мікроструктурах сплавів від контакту з абразивними частками, встановив, що площа реального контакту може складати 50 - 300 мкм, що співрозмірно з площею твердого включення карбиду та бориду.

Згідно принципу Шарпі матриця сплаву зношується швидше під час взаємодії інструменту з абразивом – рух в напрямку швидкості  $V$ , граничний знос основи відповідає кривій 2 - 3 - 4 - 1. Зрештою відбувається викришування зміцнювальної фази, коли лінія 3 - 4 не перетинає тіло частки I. З трикутника, що утворився, з катетом  $d$  (діаметр зміцнювальної фази), гіпотенузою  $S$  (відстань між центрами зміцнювальних фаз) мінімальний знос нанесеного матеріалу спостерігається під час виконання такої умови:

$$d \geq S \cos \beta, \quad (1)$$

де  $S$  – відстань між центрами зміцнювальної фази;

$\beta$  – кут між утворюючою різця та лінією, перпендикулярною до напрямку руху;

$d$  – діаметр зміцнювальної фази спрощеної округлої форми.

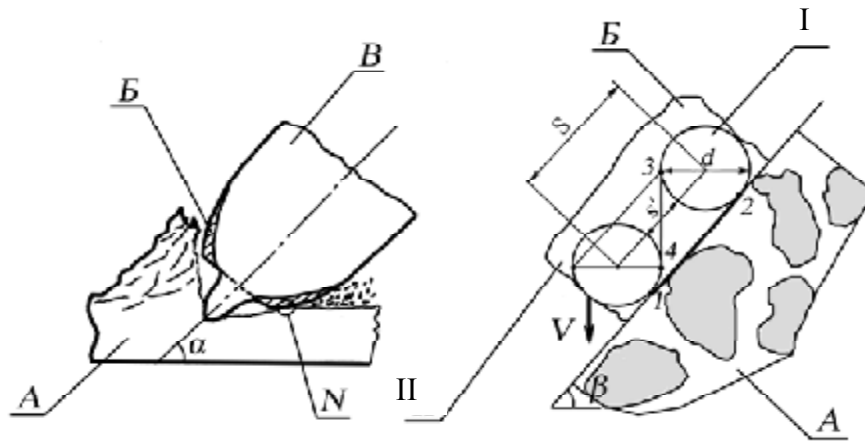


Рис. 2 – Графічна модель взаємодії гетерогенного сплаву з абразивом:

$A$  – асфальтобетон;  $B$  – шар зносостійкого матеріалу;  
 $B$  – різець дорожньої фрези;  $\Gamma$  – абразивні частки граніту;  
 I – зміцнювальна фаза у вигляді часток округлої форми;  
 II – матриця зносостійкого матеріалу

Тоді відстань між частками повинна скласти:

$$s' = S - d, \quad s' \leq \frac{d(1 - \cos \beta)}{\cos \beta}. \quad (2)$$

Тож аналіз показує, що скорочення відстані  $s'$  призводить, з одного боку, до підвищення щільності розташування зміцнювальної фази у матриці та збільшення агрегатної твердості, а, з іншого, – обумовлює зростання крихкості та зниження технологічної міцності сплавів в результаті сколювання і відшарування мікрооб'ємів металу у процесі експлуатації. Тому у даному випадку їх зносостійкість знижується. Виходячи з цього, в умовах багато циклових контактних навантажень тривала взаємодія зміцнювальної фази із закріпленим абразивом потребує її оновлення. Це може відбуватися тільки за фактом деструкції основи (згідно принципу Шарпі) шляхом зношування матриці та зменшення її рівня відносно твердих вкраплень, що виступають над умовною поверхнею тертя. Тому, з урахуванням вище зазначеного, відстань між частками зміцнювальної фази повинна відповідати умовам:

$$S = \frac{d}{\cos \beta}; \quad (3)$$

$$s' = \frac{d(1 - \cos \beta)}{\cos \beta}. \quad (4)$$

Маючи крок між частками, визначаємо кількість зміцнювальної фази  $K$  на ділянці площею  $F$ . Приймаючи розташування зерен за схемою рівностороннього трикутника, кількість зміцнювальної фази на такій ділянці визначається як:

$$K = \frac{2F}{\sqrt{3}S^2}. \quad (5)$$

Отже, кількість зміцнювальної фази  $K$  знаходиться в зворотньо-пропорційній квадратичній залежності від відстані між центрами зерен (рис. 3). Таким чином, на підставі графоаналітичного аналізу запропонованої аналітичної моделі виходить, що при кількості зміцнювальної фази 65 - 70 %, оптимальна відстань між твердими включеннями повинна складати приблизно 4,0 - 4,21 мкм.

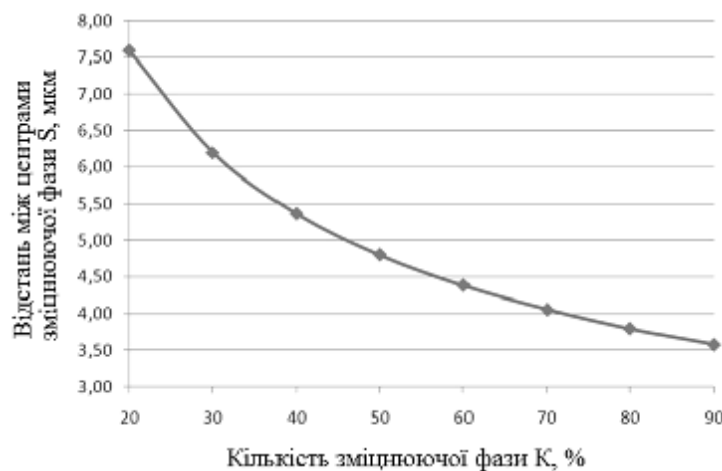


Рис. 3 – Вплив кількості зміцнювальної фази ( $K$ ) на відстань між центрами зміцнювальної фази ( $S$ ), що забезпечує максимальну зносостійкість (на площу наплавленого шару 1000 мкм)

Загальна товщина наплавленого шару (рис. 4) укладається з наступного математичного опису:

$$\delta = t(d + p), \quad (6)$$

де  $p$  – товщина матриці зносостійкого матеріалу;

$d$  – діаметр зміцнювальної фази;

$t$  – кількість шарів.

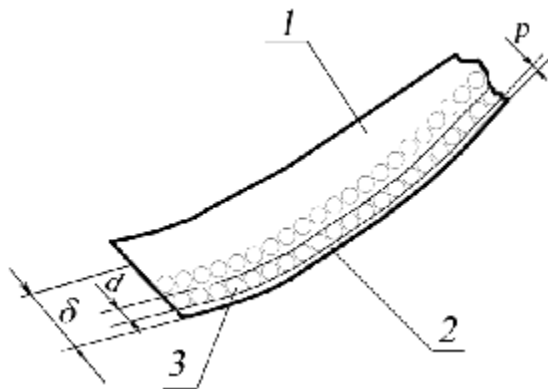


Рис. 4 – Конструктивна схема розміщення зносостійких шарів гетерогенного сплаву на поверхні корпусу різця дорожньої фрези:

1 – матеріал корпусу різця;

2 – шар матриці зносостійкого матеріалу;

3 – шар зміцнювальної фази у вигляді часток округлої форми

Тоді в об'ємі:  $V = \delta F$  знаходиться  $N$  частинок із загальною масою:

$$m_s = K \frac{\pi d^3}{6} \rho_{y.\phi.} = \frac{\pi d^3 \rho_{y.\phi.} F}{3\sqrt{3}S^2} = \frac{\pi d \rho_{y.\phi.} F \cos^2 \beta}{3\sqrt{3}}, \quad (7)$$



при цьому маса матриці сплаву складе:

$$m_m = \left( V - K \frac{\pi d^3}{6} \right) \rho_m = F \rho_m \left( \delta - \frac{\pi d \cos^2 \beta}{3\sqrt{3}} \right), \quad (8)$$

де  $\rho_{y.f.}$ ,  $\rho_m$  – щільність зерен зміцнювальної фази і матриці.

Тоді співвідношення мас зерен твердих включень до матриці складе:

$$\begin{aligned} \frac{m_{y.f.}}{m_m} &= \frac{\rho_{y.f.}}{\rho_m} \cdot \frac{\pi d \cos^2 \beta}{3\sqrt{3}t(d+p) - \pi d \cos^2 \beta} = \\ &= \frac{\rho_{y.f.}}{\rho_m} \cdot \frac{\cos^2 \beta}{3\sqrt{3}(\pi^{-1}t + z) - \cos^2 \beta}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $z$  – коефіцієнт, що показує відношення товщини шару матриці до діаметру зміцнювальної частки.

Виходячи з одержаних математичних рівнянь (7) - (9), кількість матриці та зміцнювальної фази визначається, виходячи з щільності матеріалів ( $\rho_{y.f.}$ ,  $\rho_m$ ), кількості шарів зміцнювального матеріалу, а також кута взаємодії  $\beta$ . Мінімально необхідна маса частинок зміцнювальної фази, що забезпечує найменший знос, виходить при кутах взаємодії 30 - 45° і 65 - 80° (рис. 5).

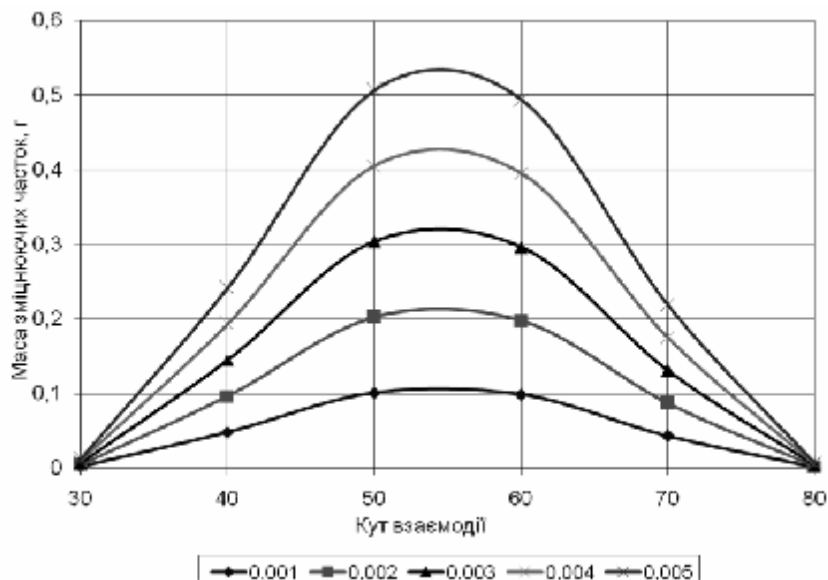


Рис. 5 – Вплив кута взаємодії та діаметру часток зміцнювальної фази на масу зміцнювальної фази на одиницю об'єму

## Висновки

Таким чином, у даному науковому дослідженні була зроблена спроба вирішення комплексної задачі розробки алгоритмів та аналітичних моделей розрахунку геометричних складових твердої фази зносостійких сплавів в умовах контакту із закріпленим абразивом, що може застосовуватися для визначення основних співвідношень між зміцнювальною фазою та абразивом згідно принципу Шарпі.

Проведені дослідження дозволили удосконалити та адаптувати аналітичну модель абразивного зношування під час взаємодії робочого органу (з нанесеним гетерогенним сплавом, що містить надлишкову зміцнювальну фазу і матрицю) в умовах закріпленого (частки граніту) контактного абразивного руйнування. Таким чином, графічна інтерпретація аналітичної моделі дозволяє у межах практичної достатності визначити оптимальне співвідношення між діаметром абразивних часток та розміром зміцнювальної фази. Крім того, доведено можливість аналітичного розрахунку відстаней між центрами твердих включень надлишкової зміцнювальної фази гетерогенних сплавів. Тож, аналіз результатів розрахунків на основі модернізованої графоаналітичної моделі дозволив встановити, що при кількості зміцнювальної фази 65 - 70 %, оптимальна відстань між частками твердої фази складає 4,0 - 4,21 мкм;

Аналіз розрахунків прогнозування оптимальної кількості, типу зміцнювальної фази з урахуванням її просторового розташування, що кристалізується в сплавах у загальному підсумку дозволив отримати кількісну оцінку їх інтенсивності руйнування в залежності від трибологічних і триботехнічних чинників спрацьовування:

- кількість матриці та зміцнювальної фази визначається виходячи з щільності матеріалів ( $\rho_{у.ф.}$ ,  $\rho_{м}$ ), кількості шарів зміцнювального матеріалу, а також кута взаємодії інструменту з абразивом  $\beta$ .

- найменший знос з урахуванням мінімально необхідної маси часток зміцнювальної фази, виходить при кутах взаємодії 30 - 45° і 65 - 80°.

Теоретичний аналіз апіорі та власних наукових досліджень дозволив встановити, що підвищення зносостійкості сплавів в умовах абразивного зношування можливо здобути завдяки примусового внесення або кристалізації зміцнювальної фази у вигляді карбідів боридів і карбоборидів та інших включень витягнутої прямокутної, розеткової чи багатокутної форми. При цьому доведено, що прогнозування кількості, типу та просторового розташування зміцнювальної фази, що кристалізується в сплавах різних систем легування, дозволяє оцінювати інтенсивність їх руйнування, а отже, рекомендувати ці матеріали для тих або інших умов зношування. У той же час, треба розуміти, що наявність допущень у моделі які не враховують параметри абразивного середовища (швидкість відносного переміщення, тиск та температуру середовища) обумовлює її статичний характер. Тому відтворення моделей прогнозу зносостійкості з урахуванням цих чинників чекає на нас у подальших наукових опрацюваннях.

### Література

1. Лившиц Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
2. Попов С.Н. Аналитическое исследование влияния технологических параметров процессов нанесения износостойких покрытий с учетом термодинамической возможности образования упрочняющей фазы / С. Н. Попов, Д. А. Антонюк // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2005. – № 7. – С. 186-197.
3. Попов В. С. Металловедческие аспекты износостойкости сталей и сплавов / В. С. Попов, Н. Н. Брыков. – Запорожье: Изд-во В.П.К. «Запорижжя», 1996. – 180 с.
4. Попов С.М. Трибологічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні / С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко // Монографія. – Запоріжжя: ЗНТУ, ВАТ «Мотор Січ», 2009. – 364 с.
5. Спиридонова И. М. Структура и свойства железоборуглеродистых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 2. – С. 58-61.
6. Данильченко Б. В. Выбор износостойкого наплавленного металла для работы в условиях абразивного изнашивания // Сварочное производство. – 1992. – № 5. – С. 31-33.
7. Попов С. Н. Оптимизация химического состава наплавленного металла деталей для работы в условиях абразивного изнашивания / С. Н. Попов // Автоматическая сварка. – 2001. – № 4. – С. 33-35.
8. Кальянов В. Н. Износостойкость наплавленного металла с повышенной долей карбидов титана / В. Н. Кальянов, А. Н. Петренко // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 59-60.
9. Рябцев И. А. Износостойкость наплавленного металла системы легирования Fe-Cr-Ti-Mo / И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев, В. Г. Васильев, Л. К. Дорошенко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 48-51.
10. Гринберг Н. А. Влияние бора на фазовое строение и свойства наплавленного металла при абразивном изнашивании / Н. А. Гринберг, И. А. Монгайт // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1978. – № 12. – С. 48-50.
11. Фаюршин А.Ф. Повышение долговечности лап культиваторов в сельскохозяйственных ремонтных предприятиях: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» / А. Ф. Фаюршин. – Уфа, 2006. – 16 с.

Поступила в редакцію 15.04.2013

Popov S.N., Antoniuk D.A. **Analytical model of geometric components solid phase calculation of wear resistant alloys in contact conditions with fixed abrasives.**

The paper attempts to solve the complex problem of developing algorithms and analytical models for calculating geometric components of the solid phase of wear-resistant alloys in contact with fixed abrasive that can be used to identify relationships between strengthens phase and abrasive according to the principle Sharpe.

The research allowed to improve and adapt the analytical model of abrasive wear by the interaction of worker body (coated with heterogeneous alloys containing strengthens phase and matrix) in a fixed (granite particle) contact abrasion damage. Thus, the graphical interpretation of the analytical model allows within practical to determine the adequacy, optimal ratio between the diameter of the abrasive particles and the size of strengthens phase. In addition, the proven ability of the analytical calculation of distances between the centers of excess solids strengthens phase heterogeneous alloys. Therefore, the analysis of simulation results based on graph-analytic model of modernized revealed that the amount of reinforcing phase of 65 - 70 %, the optimum distance between the particles of the solid phase is 4,0 - 4,21 m;

Analysis calculations predict the optimal number, type of strengthens phase, taking into account its spatial location, which crystallizes in alloys in grand total allowed receive the quantitative assessment of fracture intensity depending on the tribological and tribotechnical factors of operation:

- number of matrix and strengthens phase is determined from the density materials ( $\rho_{y.f.}$ ,  $\rho_m$ ), the number of layers of strengthens material and the angle of interaction tools with abrasive  $\beta$ .

- the smallest wear considering minimum required mass particle of strengthens phase obtained in interaction angles 30 - 45° and 65 - 80°.

**Keywords:** heterogeneous alloy, wear resistance, strengthens phase, abrasive wear.

### References

1. Livshic L. S., Grinberg N. A., Kurkumelli Je.G. Osnovy legirovaniya naplavlennogo metalla. M., Mashinostroenie, 1969. 188 p.
2. Popov S.N., Antonjuk D. A. Analiticheskoe issledovanie vlijaniya tehnologicheskikh parametrov processov naneseniya iznosostojkikh pokrytij s uchetom termodinamicheskoy vozmozhnosti obrazovaniya uprochnjajushhej fazy. Visnik SNU im. V. Dalja. 2005. No 7 . pp.186-197.
3. Popov V. S., Brykov N. N. Metallovedcheskie aspekty iznosostojkosti stalej i splavov. Zaporozh'e: Izd-vo V.P.K. «Zaporizhzhja», 1996. 180 p.
4. Popov S.M. , Antonjuk D. A., Netrobko V. V. Tribologichni ta materialoznavchi aspekti rujnuvannja stalej i splaviv pri znoshuvanni. Monografija. Zaporizhzhja, ZNTU, VAT «Motor Sich», 2009. 364 p.
5. Spiridonova I. M. Struktura i svojstva zhelezoborouglerodistykh splavov. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. 1984. No 2,pp. 58–61.
6. Danil'chenko B. V. Vybor iznosostojkogo naplavlennogo metalla dlja raboty v uslovijah abrazivnogo iznashivaniya. Svarchoe proizvodstvo. 1992. –No 5. pp. 31–33.
7. Popov S. N. Optimizacija himicheskogo sostava naplavlennogo metalla detalej dlja raboty v uslovijah abrazivnogo iznashivaniya. Avtomaticheskaja svarka. 2001. No 4. pp. 33–35.
8. Kal'janov V. N., Petrenko A. N. Iznosostojkost' naplavlennogo metalla s povyshennoj dolej karbidov titana. Avtomaticheskaja svarka. 2004. No 12. pp. 59–60.
9. Rjabcev I. A., Kondrat'ev I. A., Vasil'ev V. G., Doroshenko L. K. Iznosostojkost' naplavlennogo metalla sistemy legirovaniya Fe-C-Cr-Ti-Mo. Avtomaticheskaja svarka. 2002. No 4. pp. 48– 51.
10. Grinberg N. A. , Mongajt I. A. Vlijanie bora na fazovoe stroenie i svojstva naplavlennogo metalla pri abrazivnom iznashivanii. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. 1978. No 12. pp. 48–50.
11. Fajurshin A.F. Povyshenie dolgovechnosti lap kul'tivatorov v sel'skohozjajstvennyh remontnyh predpriyatijah. Avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.20.03 «Tehnologii i sredstva tehničeskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozjajstve», Ufa, 2006. 16 p.