

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).54-65](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).54-65)**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **І.Ф. Василенко**, доц., канд. техн. наук,**М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com; vasylenko.ivan@gmail.com; krasotamv@ukr.net*

Теоретичне обґрунтування експлуатаційних властивостей деталей автомобілів, зміцнених композиційними покриттями, методом кластерних компонентів

У статті теоретично обґрунтовано експлуатаційні властивості деталей автомобілів, зміцнених композиційними покриттями, з використанням методу кластерних компонентів. Вибираючи різні набори параметрів, а також варіюючи систему обмежень на них, можна здійснити формування комплексу експлуатаційних властивостей деталей. Для спрощення моделі впакування композиційних покриттів і матеріалів прийнято вважати наповнювачі різного складу, ізометричної форми та однакового розміру. Запропоновані їх регулярні структури, що відповідають упаковці куль однакового розміру. Показано, що такі упаковки утворюють решітки аналогічні атомним кристалічним структурам. Виявлено залежності функції властивостей композиційних покриттів від вмісту кожного з видів кластерних компонентів. Метод кластерних компонентів, описуючи зміни властивостей композиційних покриттів від співвідношення компонентів, дає можливість управляти комплексом експлуатаційних властивостей й отримати якісні покриття для підвищення довговічності деталей, систем і агрегатів автомобілів.

композиційне покриття, кластерний компонент, упаковка, експлуатаційні властивості**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **І.Ф. Василенко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна*

Теоретическое обоснование эксплуатационных свойств деталей автомобилей, упрочненных композиционными покрытиями, методом кластерных компонентов

В статье теоретически обоснованы эксплуатационные свойства деталей автомобилей, упрочненных композиционными покрытиями с использованием метода кластерных компонентов. Выбирая те или иные наборы параметров, а также варьируя систему ограничений на них, можно осуществить формирование комплекса эксплуатационных свойств деталей. Для упрощения модели упаковки композиционных материалов и покрытий принято считать, что наполнители разного состава имеют изометрическую форму и одинаковый размер. Предложена регулярная структура, соответствующая упаковке сфер одинакового размера. Показано, что такие упаковки образуют решетки аналогичные атомным кристаллическим структурам. Выявлены зависимости функции свойств композиционных покрытий от содержания каждого из видов кластерных компонентов. Метод кластерных компонентов, описывая изменения свойств композиционных покрытий от соотношения компонентов, даёт возможность управлять комплексом эксплуатационных свойств и получить качественные покрытия для повышения долговечности деталей систем и агрегатов автомобилей.

композиционное покрытие, кластерный компонент, упаковка, эксплуатационные свойства

Постановка проблеми. Ряд ресурсовизначальних деталей систем і агрегатів автомобілів в процесі експлуатації підлягають інтенсивному зношуванню та процесам втоми, а тому не витримують планованого ресурсу роботи. Важливим резервом підвищення надійності та ефективності використання такої техніки є зміцнення робочих поверхонь її деталей композиційними матеріалами та покриттями. Зазначений спосіб зміцнення дає можливість, управляючи структурою композиційних матеріалів і

покриттів, сформувати необхідний комплекс експлуатаційних властивостей деталей, щоб забезпечити належний рівень надійності й підвищити довговічність. Разом з тим це потребує теоретичного обґрунтування, щоб встановити відповідність між структурою, складом, розподілом хімічних елементів нанесеного на деталі композиційного покриття та їх експлуатаційними властивостями, такими як зносостійкість, утомна міцність та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах інтенсивного абразивного зношування поверхневих шарів деталей машин ефективно працюють композиційні матеріали, що складаються з пластичної матриці та твердого тугоплавкого наповнювача, твердість якого має бути вищою за твердість абразивних зерен. Зносостійкість гетерогенних композиційних матеріалів та покриттів досліджено в роботі [1]. Нанесення композиційних покриттів та формування необхідного комплексу властивостей здійснювали, використовуючи лазерні технології [2, 3] та проводили модифікацію [4, 5] сформованих композиційних покриттів безперервною та дискретною лазерними обробками [6, 7]. Показано, що лазерні технології формування композиційних покриттів викликають ряд аномальних ефектів: масоперенос, тепло- та електропровідність, локальна самоорганізація, істотна нерівномірність матеріалу [8, 9, 10].

Визначено, що експлуатаційні властивості деталей сільськогосподарської та автотранспортної техніки залежать передусім від розташування складових (матриця, наповнювач) композиційних матеріалів і покриттів, їх характеристик і властивостей [11, 12].

Показано, що характеристики і властивості композиційних матеріалів і покриттів залежать як від технології їх формування, так і режимів використання [13-17].

Покращити характеристики та властивості композиційних матеріалів і покритої їх реалізації доцільно використовувати методи моделювання і теоретичного обґрунтування.

Вплив об'ємного вмісту наповнювача на експлуатаційні властивості зміцнених композиційними матеріалами і покриттями деталей досліджено в роботі [18]. Фізичні обґрунтування, фізико-хімічні основи створення і моделювання властивостей композиційних покриттів і матеріалів триботехнічного призначення наведені в роботах [19, 21]. Технологія формування композиційних покриттів з використанням порошкових дротів і дослідження комплексу їх властивостей відображено в роботах [22-23].

Перспективи теоретичних досліджень полів температур і напружень композиційних покриттів і матеріалів при експлуатації розглянуто в роботах [24-27]. Визначено, що вирішальним фактором формування властивостей композиційного матеріалу, якщо виходити з його внутрішніх взаємозв'язків, є структура. На відміну від структури твердого тіла (компакта), структура композиційних матеріалів (КМ) і композиційних покриттів (КП) багаторівнева. Макроскопічна структура КП являє собою упаковку об'єктів макроскопічних розмірів – частинок, які можуть відрізнятися кількісними (геометричний розмір, форма) та якісними (складом, розподілом хімічних елементів) характеристиками.

Врахувати всі рівні структури КП і КМ в межах змістовної моделі вельми складно. Вагомим кроком до створення теорії формування та прогнозування властивостей КП є врахування структури як на макроскопічному, так і на субмакроскопічному рівнях. При цьому доцільно використати напівемпіричний метод, що базується на стереометричних моделях порошкового матеріалу. В цьому напрямку на увагу заслуговує метод кластерних компонентів (МКК) [28].

МКК – це спроба побудови кількісної теорії формування сукупності властивостей КП і КМ як багатокомпонентних фізико-хімічних систем зі складною структурою. В основі методу лежить припущення про те, що у складній фізико-хімічній системі можна виділити такі конфігураційні утворення, які несуть інформацію про властивості всієї системи і мають чітку фізичну природу та обмежену кількість.

Постановка завдання. Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування використання методу кластерних компонентів для визначення і формування комплексу необхідних експлуатаційних властивостей, що забезпечують надійну та ефективну роботу деталей систем і агрегатів автомобілів.

Виклад основного матеріалу. Композиційне покриття на робочих поверхнях деталей та композиційний матеріал розглядаємо як систему. Згідно з МКК будь-яку експлуатаційну властивість КП представимо у вигляді функції відсоткового вмісту кожного з видів та характеристик параметрів кластерних компонентів (КК):

$$f = f(\alpha_1, \dots, \alpha_n; f_1, f_2, \dots, f_s), \quad (1)$$

де α_i – відносний вміст КК, що визначає стан КП та КМ як системи;

f_1, f_2, \dots, f_s – характеристики КК;

n – кількість видів КК, $s \geq n$.

Параметри, що характеризують КП і КМ залежать від $k-1$ -компонентного вектора складу:

$$\bar{c} = (c_1 \dots c_{k-1}); \quad \sum_{i=1}^k c_i = 1, \quad (2)$$

де c_i – відносний вміст i -го компонента.

Аналогічно до формально-статистичного підходу в МКК при визначенні властивостей КП і КМ також обмежуються адитивними моделями

$$f(c) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(c) f_i. \quad (3)$$

При цьому у якості базису вибирають спеціальні набори КК, які пов'язані з інваріантним способом уявлення складної системи, стан якої визначається набором параметрів t_0, t_1, \dots, t_l . За базисні орти взято набір векторів, у яких всі координати, крім однієї дорівнюють нулю. Вибираючи різні сукупності параметрів, а також варіюючи системою обмежень на них (якщо це можливо), можна по різному представити КП та КМ на мові КК. Зазначене являє змістовну частину задачі вибору КК.

Якщо наявний набір частинок наповнювача КП та КМ різного складу ізометричної форми і однакового розміру, то в якості моделі упакування цих частинок може бути використана регулярна структура, що відповідає різного типу упакуванням куль наповнювача та матриці однакового розміру. Ці упакування можливо уявити як утворення ґраток, аналогічних атомним кристалічним структурам. Відстань між найближчими вузлами структури є радіусом першої координаційної сфери, наступний – радіусом другої сфери тощо. Аналогічно до структури металів, можна виділити найпростіші типи упакувань частинок у КП і КМ: проста кубічна (ПК), об'ємно-центрована кубічна (ОЦК), гранецентрована кубічна (ГЦК) та гексагональна щільно упакована структура (ГЩУ). Виходячи з цього, весь об'єм КП та КМ можна уявити заповненим просторово-симетричними елементами, центри яких відповідають вузлам зазначених просторових ґраток. При цьому приймаємо, що кожна частинка осердя порошкового дроту являє собою сферу певного радіусу і сформоване КП є певним набором конгруентних сфер.

Набір КК однозначно подається у вигляді матриці, кількість стовпців якої відповідає кількості сортів частинок у моделі, а кількість рядків дорівнює кількості вузлів фігури, вибраної за базисну. Ґратка являє собою суперпозицію базисних фігур, заповнених певним чином частинками системи. Заповнення ґратки носить імовірнісний

характер, а вузли її мають однакову статистичну вагу. Загальна імовірність заповнення i -го вузла m -вузельної фігури складає $1/m$.

Для опису бінарної системи з m -вузельною базисною фігурою слід ввести $m-1$ параметр типу η . Це можливо зробити таким чином. Припускають, що імовірність знаходження частинки A у i -му вузлі дорівнює:

$$P_A^i = \sum_{j=1}^{m-1} b_{ij} \eta_j + c/m, \quad (4)$$

де c , $1-c$ – відповідні відносні концентрація частинок A і B , b_{ij} – елементи довільної невиврожденної матриці ($\det b \neq 0$).

$$b = \begin{pmatrix} b_{11} \dots b_{1n-1} & 1/m \\ \dots & \dots \\ b_{n1} \dots b_{nm-1} & 1/m \end{pmatrix}. \quad (5)$$

У випадку рівності нулю усіх η_j ($j=1, \dots, m-1$) (4), має вигляд:

$$P_A^{(i)} = c/m \quad (6)$$

Вибір базисної конфігурації обумовлено геометрією ґратки, що описує систему КП (КМ), а також порядком обраного наближення. Кількість КК при матричному уявленні дорівнює k^m , тобто для бінарної системи з щільною упаковкою маємо шістнадцять КК.

Визначення КК як конфігурацій однотипних фігур ґратки дозволяє коректно обчислювати концентрації КК у повній відповідності з конфігураційними наближеннями статистичної теорії впорядкування.

Наведена інтерпретація має наочне представлення і простий фізичний зміст у разі змішування порошків A і B частинками, що мають однаковий розмір при формуванні КП (КМ). У кожній з підсистем існують тільки “чисті” КК складу AA і BB , а при об’єднанні підсистем в одну виникають утворення проміжного складу типу AB . Конфігураційна ентропія системи КП (КМ) при цьому зростає й оцінюється логарифмом кількості способів розподілу. Утворення КК проміжного складу описується квазіхімічною реакцією між вихідними КК.

У найпростішому варіанті методу, коли в якості КК вибрані пари AA , AB й BB (вузли 1 та 2 еквівалентні), квазіхімічна реакція однозначна й записується, виходячи з закону збереження речовини: $A_2 + B_2 = 2AB$, а повний набір цих реакцій – з π -теорему.

Матрицю зв’язку доповнюють рядками, відповідними розкладу матриці M_j за базисами, які відповідають внутрішнім параметрам, типу η_i , коли $i=1, 2, 3$:

$$M_j = \sum_{i=0}^l \delta_{ij} M_i, \quad (7)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

Утворюють також матрицю

$$C = -QP^{-1} | E_r, \quad (8)$$

де P^{-1} – матриця обернена до матриці P , E_r – одинична матриця порядку r , $|$ – операція правої конкатенації (приписування праворуч) матриць. Зазначимо, що кожний рядок матриці C дає коефіцієнт квазіхімічних реакцій між КК.

Якщо всі обмеження на елементи матриці композита є лише умовами еквівалентності вузлів базисної фігури, то набір квазіхімічних реакцій має особливо простий вигляд.

Для бінарних КП (КМ) складу $A_c B_{1-c}$, що задається матрицею M розміру $m \times r$, у якості P вибираємо мінор з рядків матриць КК складу B , A , а також матриць M_i ($i=1, \dots, m-1$) відповідно параметрам типу η_j

Тоді рядки матриці C мають вигляд:

$$\begin{aligned} &(-(1-c_i)\dots - c_i | \dots 1 \dots), \\ &-(1-c_i)B - c_i A + A_{c_i} B_{1-c_i} + \sum_1^{l-1} \gamma_i M_i = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

або подаються у звичайному вигляді квазіхімічних реакцій:

$$c_i A + (1-c_i)B = A_{c_i} B_{1-c_i}. \quad (10)$$

Використовуючи квазіхімічний формалізм МКК, а також закон діючих мас до квазіхімічних реакцій між КК, у парному наближенні для ОЦК-гратки з характерним радіусом $l=1$, маємо:

$$\left. \begin{aligned} K \alpha_A \alpha_B &= \alpha_{A_{1/2} B_{1/2}}^2 \\ \alpha_A + \frac{1}{2} \alpha_{AB} &= c \\ \frac{1}{2} \alpha_{A_{1/2} B_{1/2}} + \alpha_B &= 1 - c \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де α_A, α_B – відносні частки КК складу A та B ;

$\alpha_{AB}, \alpha_{A_{1/2} B_{1/2}}$ – відносні частки КК еквіоб'ємного складу A і B ;

c – відносна концентрація частинок складу A .

Вид функцій $\alpha_i(c)$ залежить від енергетичних констант квазіхімічних реакцій. У випадку двох КК $\alpha_A=c, \alpha_B=1-c$, а функція експлуатаційної властивості буде лінійною:

$$f = c f_A + (1-c) f_B. \quad (12)$$

При великій кількості КК вираз (12) зручно подати у вигляді:

$$f = c f_A + (1-c) f_B + \Delta f(c), \quad (13)$$

де f_A, f_B – властивості КК тільки частинок A або B , $\Delta f(c)$ – нелінійна частина f :

$$\Delta f(c) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(c) \Delta f_i \quad (14)$$

α_i – вага КК складу $A_{p_i} B_{1-p_i}$.

Зазначимо, що підсумовування проводиться по усім КК проміжних складів, тоді маємо:

$$\Delta f_i = f_i - p_i f_A - (1-p_i) f_B \quad (15)$$

Вираз (15) характеризує нелінійну частину внеску у властивість f .

Базисній фігурі з двох вузлів відповідають три КК складу $B, A_{1/2} B_{1/2}, A$. При цьому система рівнянь (11) має розв'язок:

$$\alpha = \frac{4c(1-c)}{1 + \sqrt{1 - 4c(1-c)\left(1 - \frac{4}{K}\right)}} \quad (16)$$

Дослідження свідчать, що функція (16) є опуклою по змінній c . Максимальне значення α , а отже і відповідні властивості “чистих” КК, досягаються в точці $c=1/2$. Досліджуючи залежність (16) при наступних значеннях K : $K_1=1/8, K_2=1/6, K_3=1/2$,

можна стверджувати, що в околі точок $c=0$ і $c=1$ внесок у властивості КП дають лише КК двох найближчих складів: чистого КК В(А) і КК складу A_{p_i}, B_{1-p_i} .

У найпростішому парному наближенні бінарну систему $A_c B_{1-c}$ можна уявити набором трьох КК, а отже параметрами моделі є $f_A, f_B, f_{A_{1/2}B_{1/2}}$ і K . Величини f_A, f_B можуть бути легко одержані експериментально. Тоді модель експлуатаційної властивості КП буде характеризуватися тільки параметрами Δf і K . Спосіб визначення цих параметрів запропоновано в роботі [9].

При відомих значеннях похідної експериментальної функції на кінцях інтервалу $f'(0), f'(1)$ матимемо

$$\Delta f = \frac{1}{2}(f_B - f_A + f'(0)); \quad (17)$$

$$\Delta f = \frac{1}{2}(f_A - f_B + f'(1)). \quad (18)$$

Ступінь узгодження величин (17) і (18) є критерієм коректності опису функції експлуатаційної властивості $f(c)$ на вибраному базисі, а для визначення величини K необхідно знати значення функції у точці, що відповідає складу КК $f(1/2)$, тобто:

$$K = 4 \frac{\Delta f(1/2)}{\Delta f - \Delta f(1/2)}, \quad (19)$$

де $\Delta f(1/2)$ визначається за виразом (14) ($n=1, c=1/2$).

Отримане значення Δf дозволяє обчислити властивість f для КК $A_{1/2}B_{1/2}$. Величину K , оцінену по одній властивості, можна використати при описі інших властивостей цієї ж системи або проводити їх прогнозування.

Для аналізу такої властивості КП (КМ) як пористість, проблема подібності виникає для систем з тотожною стереометрією частинок. При даній упаковці частинок величина пористості є функцією їх геометрії:

$$P = \sum \alpha_i P_i, \quad (20)$$

де P_i – частка порожнього простору, що приходить на i -й КК. Якщо конгруентні частинки всіх сортів порошку є дійсно ідеально сферичними, то для їх щільної упаковки $P_i=0,26$ і пористість складає 26%. Відмітимо, що реальна пористість КП на багато менша за рахунок деформації частинок при термомеханічному впливі під час формування КП і синтезі КМ. На мові МКК це може бути враховано зміною вкладів f_i в пористість від КК різного складу.

Наведений підхід залишається прийнятним до тих пір, поки розміри порожнин упаковки багато менші середнього розміру самих частинок. Якщо ця умова порушується, то аналогічно до розгляду точкових дефектів у регулярній кристалічній ґратці твердого тіла порожнини повинні розглядатися як окремий компонент моделі, з їх вмістом в КП (КМ).

Таким чином, модель МКК, описуючи зміни властивостей КП від відносної частки компонентів, дозволяє інтерпретувати залежність пористість–властивість, коли пористість матеріалу визначається за виразом (20).

Розглянутий підхід до моделювання залежності експлуатаційних властивостей КП (КМ) від їх складу базується на уявленні КП (КМ) як набору КК з постійними внесками у ту чи іншу експлуатаційну властивість деталей систем і агрегатів автомобіля. Разом з тим при зовнішньому впливі в структурі КП (КМ) можуть відбуватись зміни, які істотно впливатимуть на властивості КК. Врахувати ці зміни найпростіше можливо рекомендувати наступним чином. Властивість кожного КК залишається сталою, а зміна властивостей композиту відбувається загалом за рахунок

зміни ваги КК. У більшості випадків поруч зі зміною ваги КК також змінюються їхня внутрішня структура і властивості.

Якщо початково КП (КМ) можна охарактеризувати n типами КК, то в результаті зовнішнього впливу при формуванні КП (КМ) кожний з них може дати різну вагу внесків у експлуатаційну властивість f . Модель цієї експлуатаційної властивості набуває вигляду:

$$f = \sum_{i=1}^n \alpha_{io} f_{io} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} f_{ij}, \quad (21)$$

де перша сума відповідає властивостям вихідних КК, а друга – усіх КК зі зміненими властивостями.

Якщо зовнішній вплив полягає у прикладенні навантаження P , то для частки кожного КК з новою властивістю f_{ij} справедливе співвідношення:

$$\alpha_{ij} = d_{ij} (1 - \exp(-\beta_{ij} \alpha)), \quad (22)$$

де α – параметр, що характеризує інтенсивність зовнішнього впливу, β_{ij} – параметр, що характеризує ступінь жорсткості i -го КК по відношенню до нового типу ij . Фактичний перехід у новий стан кожного КК є активізаційним процесом, а величину $\beta_{ij} \alpha$ можливо вважати енергією активації цього переходу. Величина d_{ij} є параметр розподілу нових КК при нескінченно великому впливі ($\alpha \rightarrow \infty$, $\alpha_{ij} \rightarrow d_{ij}$). У процесах контактного наварювання КП роль параметру α природно можливо приписати тиску P як технологічному параметру.

Висновки.

1. Запропоновано композиційні покриття та композиційні матеріали розглядати як системи, що характеризуються визначеним комплексом експлуатаційних властивостей у залежності від вмісту наповнювача та регулярності структури.

2. Згідно з теорією кластерних компонентів вміст i -го компоненту C_i визначає параметри та властивості композиційних покриттів та матеріалів. Метод кластерних компонентів дає можливість комплекс експлуатаційних властивостей представити як адитивну модель його складових. Упакування компонентів в композиційних покриттях і матеріалах уявляється атомними кристалічними структурами: простою кубічною, об'ємно-центрованою кубічною, гранецентрованою кубічною та гексагональною щільно упакованою.

3. Розглянуто реалізацію методу кластерних компонентів на прикладі бінарної системи компонентів А і В. Вибрано базисну конфігурацію у відповідності до наближень статистичної теорії впорядкування. Дано наочну інтерпретацію та фізичний зміст суміші порошків, складових композиційних покриттів і матеріалів, частинок А і В. Розглянуто конфігураційну ентропію та утворення кластерних компонентів проміжного складу АВ поряд з базовими АА і ВВ. Виходячи з π -теореми, окреслено повний набір квазіхімічних реакцій.

4. Для бінарних композиційних покриттів і матеріалів $A_c B_{1-c}$ побудовано матриці розміру і відносного вмісту компонентів, використано квазіхімічний формалізм методу кластерних компонентів та закон діючих мас для об'ємно-центрованої кубічної ґратки. Це враховано при побудові функціональних моделей експлуатаційних властивостей. Проведено їх уточнення за критерієм коректності.

Список літератури

1. Аулін В.В. Зносостійкість гетерогенних композиційних матеріалів та покриттів в умовах абразивного зношування. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2006. Вип.39. С.38-43.

2. Аулін В.В. Абразивна зносостійкість лазерно-модифікованих композиційних покриттів. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КДТУ*. 2003. Вип. 12. С.219-223.
3. Аулін В.В., Бобрицький В.М., Батехін В.Б. Використання концентрованих потоків енергії при формуванні локальних зміцнених зон та композиційних покриттів на деталях машин. *Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. трудов XII междунар. научн.-техн. конф. в г. Севастополе 12-17 сентября 2005*. В 5 томах. Донецьк: ДонНТУ. 2005. Том 1. С. 30-33.
4. Аулін В.В., Бобрицький В.М., Златопольський Ф.Й. Вплив на зносостійкість композиційних матеріалів процесів, що протікають на межі їх складових. *Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 4-й международной научн.-техн. конф., 24-26 мая 2005, г. Ялта*. К.: АТМ України, 2005. С.289-291.
5. Аулін В.В. Створення композиційних дисперсно-зміцнених покриттів на деталях СГТ з використанням лазерного випромінювання. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2003. Вип. 33. С.310-316.
6. Черновол М.И., Аулин В.В., Соловых Е.К. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники композиционными материалами с применением лазерного излучения. *Сварка. Контроль. Реновация – 2003. Труды третьей международной научн.-техн. конф. (г. Уфа, 27-31 октября 2003 г.)*. Уфа: Гилем, 2003. С.308 – 313.
7. Черновол М.И., Аулин В.В. Упрочнение деталей машин композиционными покрытиями. *AFES2005 Proceeding. The sixth international scientific forum aims for future of engineering science. – march 23-30*. 2005. Hong-Kong. P. 86-91.
8. Аулін В.В., Бобрицький В.М., Златопольський Ф.Й. Вплив на зносостійкість композиційних матеріалів процесів, що протікають на межі їх складових. *Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 4-й международной научн.-техн. конф., 24-26 мая 2005, г. Ялта*. К.: АТМ України, 2005. С.289-291.
9. Аулін В.В. Вплив характеристик компонентів контактуючих композиційних матеріалів і покриттів на параметри та властивості зони тертя. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький: ХНУ. 2006. №4 (42). С. 110-112.
10. Аулін В.В. Триботехнічні властивості деяких композиційних покриттів. *Вісник ХДТУСГ. Підвищення надійності відновлених деталей машин*. Вип. 14. Харків, 2003. С.170-174.
11. Канович М.З., Трофимов Н.Н. Сопротивление композиционных материалов: монография. М.:Мир, 2003. 504 с.
12. Савуляк В.І. Наукові засади формування на сплавах заліза композиційних металокарбідних шарів зі стабільними структурами та підвищеними триботехнічними характеристиками: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.02.01. НАН України. Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича. К., 2004. 39 с.
13. Аулін В.В., Солових Є.К., Бобрицький В.М., Жулай О.Ю. Моделювання процесів формування структурозалежних властивостей при проектуванні композиційних матеріалів і покриттів. *Сб. трудов XIII Международной научн.-техн. конф. 11-16 сентября 2006 г. в Севастополе*. В 5 томах.. Донецьк: ДонНТУ, 2006. Том 5. С. 231-239.
14. Аулін В.В., Бісюк В.А. Програмно-технічні засоби автоматизованої системи керування технологічним процесом зміцнення деталей композиційними матеріалами. *Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК 2010). Третя міжнародна наук.-практ. конф. 24-26 травня 2010 року, Київ, Україна*. К.: НАУ, 2010. С.143-145.
15. Пат. 47581 Україна, МПК(2009) H05B 6/06. Спосіб автоматизації керування температурою наплавлення композиційного покриття / Аулін В.В., Черновол М.І., Бісюк В.А. та ін.; заявник і патентоотримувач КНТУ. №u200909294; заявл. 10.09.2009; опубл. 10.02.2010; Бюл.№ 3.
16. Пат. № 8907 Україна, МПК 7G01G11/00 (2005). Спосіб багатоконпонентного дозування сипкого матеріалу / Аулін В.В., Бісюк В.А., Віхрова Л.Г., Бобрицький В.М.; заявник і патентоотримувач КНТУ. №u200502779; заявл.28.03.05;опубл.15.08.2005; Бюл.№8.
17. Черновол М.И., Аулин В.В., Бісюк В.А. Залежність якості від керованих параметрів індукційного наплавлення зміцнюючих композиційних покриттів. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2012). Тези п'ятої міжнар. наук.-практ. конф. 15-16 травня 2012 року, Київ, Україна*. К.: НАУ, 2012. С. 216-218.
18. Аулін В.В. Визначення об'ємного вмісту наповнювача в антифрикційному композиційному покритті. *Машинознавство*, 2004. №7 (85). С. 49-53.
19. Аулін В.В. Деякі питання фізики створення та математичного моделювання властивостей композиційних покриттів триботехнічного призначення. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький: ХНУ. 2006. №2. С. 88-100.

20. Аулін В.В., Зіновик М.А., Дубовик В.О. Фізико-хімічні основи створення композиційних матеріалів триботехнічного призначення із структурою шпінелі. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. 2007. №2 (44). С.63-66.
21. Аулін Віктор Васильович. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки. Дисертація д-ра техн. наук: 05.02.04, Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 447 с.
22. Василенко І.Ф. Дослідження властивостей композиційних покриттів, нанесених контактним наварюванням порошкових дротів. *Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. Кіровогр. нац. техн. ун-ту*. 2014. Вип. 27. С. 60-67.
23. Василенко І.Ф. Вибір матеріалів порошкових дротів для нанесення композиційних покриттів. *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. Вип. 28. С. 154-159.
24. Аулін В.В., Бобрицький В.М. Комп'ютерне моделювання полів температур та напружень в композиційних матеріалах та покриттях при їх формуванні, терті та зношуванні. *Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування., автоматизація: зб. наук. пр. Кіровогр. нац. техн. ун-ту*. 2014. Вип. 27. С.235-245.
25. Аулін В.В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання. *Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія: Технічні науки*. Луганськ: ЛНАУ. 2006. №.65(88). С.13-20.
26. Аулін В.В. Стан питання теорії зносу композиційних матеріалів і покриттів. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Техн. сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосп. машинобуд.* 2005. Вип. 40. С.82-87.
27. Черновол М.І., Аулін В.В. Фізичні основи створення композиційних матеріалів і покриттів триботехнічного призначення. *Вісник інженерної академії України*. №2-3. 2006. С. 80-87.
28. Сороков С. Кластерний підхід до розрахунку фізичних характеристик композитних матеріалів. Львів: Ін-т фізики конденс. систем НАНУ, 2003. 23 с.

References

1. Aulin, V.V. (2006). Znosostiikist heterohennykh kompozytsiinykh materialiv ta pokryttiv v umovakh abrazyvnoho znoshuvannia. [Wear resistance of heterogeneous composite materials and coatings under conditions of abrasive wear]. *Praci Tavrijskoyi derzhavnoyi agrotehnikhnoyi akademiyi – Works of the Tavriya State Agrotechnical Academy*, 39, 38-43 [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V. (2003). Abrazyvna znosostiikist lazerno-modyfikovanykh kompozytsiinykh pokryt [Abrasive wear resistance of laser-modified composite coatings]. *Zbirnyk naukovykh prats KDTU. Tehnika v silskogospodarskomu virobnictvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatizaciya – Collection of scientific works of KSTU. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 12, 219-223 [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Bobrickij, V.M., & Batyehin, V.B. (2005). Viktorystannya koncentrovanih potokiv energiyi pri formuvanni lokalnih zmichenih zon ta kompozicijnih pokryttiv na detalyah mashin [The use of concentrated energy flows in the formation of local reinforced zones and composite coatings on machine parts]. *Mashinostroenie i tehnosfera XXI veka. Sb. trudov XII mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. v g. Sevastopole 12-17 sentyabrya 2005 – Mechanical engineering and technosphere of the XXI century. Sat. Proceedings of the XII International. scientific and technical conf. in Sevastopol, September 12-17, 2005*, 1, 30-31. Donetsk: DonSTU [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Bobrickij, V.M., & Zlatopolskij, F.J. (2005). Vpliv na znosostijkist kompozicijnih materialiv procesiv, shcho protikayut na mezhi yih skladovih [Influence on wear resistance of composite materials of the processes proceeding on the border of their components]. *Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij. Materialy 4-j mezhdunarodnoj nauchn.-tehn. konf., 24-26 maya 2005, g. Yalta – Surface engineering and product renovation. Materials of the 4th international scientific and technical. Conf., May 24-26, 2005, Yalta (pp. 289-291)*. K.: ATM of Ukraine [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V. (2003). Stvorennia kompozytsiinykh dyspersno-zmitsnennykh pokryttiv na detaliakh SHT z vykorystanniam lazernoho vyprominiuvannia [Creation of composite disperse-strengthened coatings on details of agricultural machinery using laser radiation] *Konstruyuvannya, virobnictvo ta ekspluataciya silskogospodarskih mashin – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, 33, 310-316 [in Ukrainian].
6. Chernovol, M.I., Aulin, V.V., & Solovyh, E.K. (2003). Vosstanovlenie detalej selskochozyajstvennoj tehniki kompozicionnymi materialami s primeneniem lazernogo izlucheniya [Restoration of parts of agricultural machinery with composite materials using laser radiation]. *Svarka. Kontrol. Renovaciya – 2003. Trudy tretej mezhdunarodnoj nauchn.-tehn. konf. (g. Ufa, 27-31 oktyabrya 2003 g.) – Welding. Control. Renovation - 2003. Proceedings of the third international scientific and technical. conf. (Ufa, October 27-31, 2003)* 308-313 [in Russian].

7. Chernovol, M.I., & Aulin, V.V. (2005) Uprochnenie detalej mashin kompozicionnymi pokrytiami [Reinforcement of machine parts with composite coatings]. *AFES2005 Proceeding. The sixth international scientific forum aims for future of engineering science. – march 23-30. 2005*, 86-91 Hong-Kong [in Russian].
8. Aulin, V.V., Bobrickij, V.M., & Zlatopolskij, F.J. (2005). Vpliv na znosostijkist kompozicijnih materialiv procesiv, sheho protikayut na mezhi yih skladovih [Influence on wear resistance of composite materials of the processes proceeding on the border of their components]. *Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij. Materialy 4-j mezhdunarodnoj nauchn.-tehn. konf., 24-26 maya 2005, g. Yalta – . Surface engineering and product renovation. Materials of the 4th international scientific and technical. Conf., May 24-26, 2005, Yalta (pp. 289-291)*. K.: ATM of Ukraine [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V. (2006). Vplyv kharakterystyk komponentiv kontaktuiuchykh kompozytsiinykh materialiv i pokryttiv na parametry ta vlastyvoli zony tertia [Influence of characteristics of components of contacting composite materials and coatings on parameters and properties of friction zone]. *Problemi tribologiyi (Problems of tribology)*, 4 (42), 110-112 [in Ukrainian].
10. Aulin, V.V. (2003). Trybotekhnichni vlastyvoli deiakykh kompozytsiinykh pokryttiv [Tribotechnical properties of some composite coatings]. *Visnyk HDGUSG. Pidvishennya nadijnosti vidnovlenih detalej mashin – Bulletin of HSTUAC. Improving the reliability of restored machine parts*, 14, 170-174 [in Ukrainian].
11. Kanovich, M.Z., & Trofimov, N.N.(2003). Soprotivlenie kompozicionnyh materialov: monografiya [Resistance of Composite Materials: Monograph]. M.: Mir [in Russian]
12. Savulyak, V.I. (2004). Naukovi zasady formuvannya na splavakh zaliza kompozytsiinykh metalokarbidnykh shariv zi stabilnymy strukturamy ta pidvyshchenymy trybotekhnichnymy kharakterystykamy [Scientific bases of formation on iron alloys of composite metal-carbide layers with stable structures and the raised tribotechnical characteristics]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. K. [in Ukrainian].
13. Aulin, V.V., Solovih, Ye.K., Bobrickij, V.M., & Zhulaj, O.Yu. (2006). Modelyuvannya procesiv formuvannya strukturozaleznyh vlastivostej pri proektuvanni kompozicijnih materialiv i pokryttiv [Modeling of processes of formation of structure-dependent properties at designing of composite materials and coverings]. *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoj nauchn.-tehn. konf. 11-16 sentyabrya 2006 g. v Sevastopole – Collection of works of the XIII International scientific and technical conf. September 11-16, 2006 in Sevastopol, Vol. 5, 231-239*. Donetsk: DonSTU [in Ukrainian].
14. Aulin, V.V., & Bisyuk, V.A. (2010). Prohramno-tekhnicni zasoby avtomatyzovanoi systemy keruvannya tekhnolohichnym protsesom zmitsnennia detalei kompozytsiinykh materialamy [Software and hardware of the automated control system of technological process of strengthening of details by composite materials]. *Integrovani intelektualni roboto-tehnicni kompleksi (IIRTK 2010). Tretya mizhnarodna nauk.-prakt. konf. 24-26 travnya 2010 roku, Kiyiv, Ukrayina – Integrated intelligent robotic systems (IIPTK 2010). The third international scientific-practical. conf. May 24-26, 2010, Kyiv, Ukraine, 143-145* [in Ukrainian].
15. Aulin, V.V., Chernovol, M.I., & Bisyuk, V.A. et al. (2010). Pat. 47581 Ukrayina. Sposib avtomatizaciyi keruvannya temperaturoyu naplavlennya kompozicijnogo pokryttia [Patent 47581 Ukraine, Method of automation of temperature control of surfacing of composite coating]. №u200909294; 10.02.2010; Statement №3 [in Ukrainian].
16. Aulin, V.V., Bisyuk, V.A., Vihrova, L.G., & Bobrickij, V.M. (2005). Pat. № 8907 Ukrayina. Sposib bagatokomponentnogo dozuvannya sipkogo materialu [Patent № 8907 Ukraine. Method of multicomponent dosing of bulk material] №u200502779; 15.08.2005; Statement №8 [in Ukrainian].
17. Chernovol, M.I., Aulin, V.V., & Bisyuk, V.A. (2012). Zalezhnist yakosti vid kerovanykh parametriv indukcyjnego naplavlennya zmicnyuyuchykh kompozicijnykh pokryttiv [Dependence of quality on controlled parameters of induction surfacing of reinforcing composite coating]. *Integrovani intelektualni robototehnicni kompleksi (IIRTK-2012). Tezi p'yatoyi mizhnar. nauk.-prakt. konf. 15-16 travnya 2012 roku, Kiyiv, Ukrayina – Integrated intelligent robotic complexes (IIPTK-2012). Abstracts of the Fifth International. scientific-practical conf. May 15-16, 2012, Kyiv, Ukraine, 216-218* [in Ukrainian].
18. Aulin, V.V. (2004). Vyznachennya ob'yemnogo vmistu napovnyuvacha v antyfrykcyjnomu kompozycijnomu pokrytti [Determination of the bulk content of the filler in the antifriction composite coating]. *Mashinoznavstvo – Mechanical Engineering*, 7 (85), 49-53 [in Ukrainian].
19. Aulin, V.V. (2006). Deyaki pitannya fizyky stvorennya ta matematychnogo modelyuvannya vlastivostej kompozycijnykh pokryttiv trybotekhnichnogo pryznachennya [Some questions of physics of creation and mathematical modeling of properties of composite coverings of tribotechnical appointment]. *Problemi tribologiyi (Problems of tribology) – Problems of tribology*, 4 (42), 88-100 [in Ukrainian].
20. Aulin, V.V., Zynovyk, M.A., & Dubovyk, V.O. (2007). Fyzyko-himichni osnovy stvorennya kompozycijnykh materialiv trybotekhnichnogo pryznachennya iz strukturoyu shpineli [Physico-chemical

- bases of creation of composite materials of tribotechnical appointment with structure of spinel]. *Problemi tribologiyi (Problems of tribology) – Problems of tribology*, 2 (44), 63-66 [in Ukrainian].
21. Aulin, V.V. (2015). Trybofizichni osnovy pidvyshchennya znosostijkosti detalej ta robochukh organiv silskogospodarskoyi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Hmelnickij. [in Ukrainian].
 22. Vasylenko, I.F. (2014). Doslidzhennya vlastyvostei kompozytsiinykh pokryttiv, nanesenykh kontaktnym navariuvanniam poroshkovykh drotiv [Investigation of the properties of composite coatings applied by contact welding of cored wires]. *Zbirnyk naukovykh prats KNTU. Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of KSTU. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 27, 60-67 [in Ukrainian].
 23. Vasylenko, I.F. (2015). Vybir materialiv poroshkovykh drotiv dlia nanesennia kompozytsiinykh pokryttiv [Selection of cored wire materials for composite coatings]. *Zbirnyk naukovykh prats KNTU. Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of KNTU. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 28, 154-159 [in Ukrainian].
 24. Aulin, V.V., & Bobrytskyi, V.M. (2014). Kompiuterne modeliuвання poliv temperatur ta napruzhen v kompozytsiinykh materialakh ta pokryttiakh pry yikh formuvanni, terti ta znoshuvanni [Computer modeling of temperature and stress fields in composite materials and coatings during their formation, friction and wear]. *Zbirnyk naukovykh prats KNTU. Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of KNTU. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 27, 235-245 [in Ukrainian].
 25. Aulin, V.V. (2006). Pole napruzhen v kompozytsiinomomu materiali ta kompozytsiinomomu pokrytti v umovakh tertia kovzannia [Stress field in composite material and composite coating under sliding friction conditions]. *Zb. nauk. prats LNAU – Collection of scientific works of LSAU*, 65(88), 13-20 [in Ukrainian].
 26. Aulin, V.V. (2005) Stan pytannia teorii znosu kompozytsiinykh materialiv i pokryttiv [The state of the theory of wear of composite materials and coatings]. *Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka, Tekhnichniy servis APK, tekhnika ta tekhnolohii u silskohospodarskomu mashynobuduvanni – Bulletin of KhSTUAC. Technical service of agro-industrial complex, technics and technologies in agricultural mechanical engineering*, 40, 82-87 [in Ukrainian].
 27. Chernovol, M.I., & Aulin, V.V. (2006) Fizychni osnovy stvorennia kompozytsiinykh materialiv i pokryttiv trybotekhnichnoho pryznachennia. Фізичні основи створення композиційних матеріалів і покриттів триботехнічного призначення [Physical bases of creation of composite materials and coverings of tribotechnical appointment]. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 2-3, 80-87 [in Ukrainian].
 28. Sorokov, S. (2003). *Klasternyi pidkhid do rozrakhunku fizychnykh kharakterystyk kompozytnykh materialiv [Cluster approach to the calculation of physical characteristics of composite materials]*. Lviv: Institute of Condensed Matter Physics of SASU [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Ivan Vasylenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Substantiation of the Operational Properties of Automobile Parts Reinforced with Composite Coatings by the Method of Cluster Components

A number of parts of car systems and units in the process of operation are subject to intensive wear and fatigue processes, and therefore do not withstand the planned service life. An important reserve for increasing the reliability and efficiency of such equipment is the strengthening of the working surfaces of its parts with composite materials and coatings. This method of strengthening makes it possible, controlling the structure of composite materials and coatings, to form the necessary set of performance properties of parts to ensure the appropriate level of reliability and increase durability. However, this requires theoretical justification to establish a correspondence between the structure, composition, distribution of chemical elements applied to the parts of the composite coating and their performance properties, such as wear resistance, fatigue strength, etc.

The purpose of this work is a theoretical justification for the use of the method of cluster components to determine and form a set of necessary performance properties that ensure reliable and efficient operation of parts of systems and units of cars.

The article theoretically substantiates the operational properties of automobile parts hardened with composite coatings using the method of cluster components. By choosing certain sets of parameters, as well as varying the system of restrictions on them, it is possible to form a complex of operational properties of parts. To simplify the packing model for composite materials and coatings, it is assumed that fillers of different compositions have an isometric shape and the same size. A regular structure is proposed, corresponding to the packing of spheres of the same size. It is shown that such packings form lattices similar to atomic crystal structures. The dependences of the function of the properties of composite coatings on the content of each of the types of cluster components are revealed. The method of cluster components, describing changes in the

properties of composite coatings from the ratio of components, makes it possible to control a set of operational properties and obtain high-quality coatings to increase the durability of parts of systems and vehicle units.

As a result of the conducted researches it is offered to consider composite coverings and composite materials as the systems characterized by a certain complex of operational properties depending on filler content and regularity of structure. According to the theory of cluster components, the content of the component determines the parameters and properties of composite coatings and materials. The method of cluster components makes it possible to present a set of operational properties as an additive model of its components. The packaging of components in composite coatings and materials is represented by atomic crystal structures: simple cubic, volume-centered cubic, face-centered cubic and hexagonal densely packed.

The implementation of the method of cluster components on the example of a binary system of components A and B is considered. The basic configuration in accordance with the approximations of the statistical ordering theory is chosen. The visual interpretation and physical content of a mixture of powders, components of composite coatings and materials, particles A and B are given. The configurational entropy and formation of cluster components of the intermediate composition AB along with the basic AA and BB are considered. Based on the π -theorem, a complete set of quasi-chemical reactions is outlined. For binary composite coatings and materials ACB1-C the matrices of size and relative content of components are constructed, the quasi-chemical formalism of the method of cluster components and the law of active masses for volume-centered cubic lattice are used. This is taken into account when building functional models of operational properties. Their specification on the criterion of correctness is carried out.

composite coating, cluster component, packing, performance properties

Одержано (Received) 16.06.2020

Прорецензовано (Reviewed) 23.06.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020

УДК 621.74

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).65-72](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).65-72)

В.М. Ломакін, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: vik284333@gmail.com

Ударостійкий чавун для молольних тіл

Проведено дослідження динамічної міцності (ударостійкості) молольних тіл, відлитих з низькохромистого чавуну в багатомісному кокіль, в залежності від вмісту хрому в сплаві. Встановлено підвищення ударостійкості виливків куль при збільшенні масової частки хрому в чавуні в межах до 1%. При цьому найбільше зростання динамічної міцності спостерігається при збільшенні масової частки хрому від 0,3% до 0,5%. При подальшому зростанні вмісту хрому ударостійкість білого низьколегованого чавуну підвищується менш помітно і при вмісту хрому 0,7-0,8% досягає максимуму.

чавун, розплав, куля, кокіль, легування, хром, ударостійкість

В.Н. Ломакин, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

Центральнoукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина

Ударостойкий чугу́н для мелющих тел

Проведено исследование динамической прочности (ударостойкости) мелющих тел, отлитых из низкохромистого чугуна в многоместном кокиле, в зависимости от содержания хрома в сплаве. Установлено повышение ударостойкости отливок шаров при увеличении массовой доли хрома в чугуне в пределах до 1%. При этом наибольший рост динамической прочности наблюдается при увеличении массовой доли хрома от 0,3% до 0,5%. При дальнейшем росте содержания хрома ударостойкость белого низколегированного чугуна повышается менее заметно, и при наличии хрома 0,7-0,8% достигает максимума.

чугун, расплав, шар, кокиль, легирование, хром, ударостойкость