

УДК 621.791.75.04

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-26>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ТУГОПЛАВКИХ ЧАСТОК ПОРШКОВОГО СЕРДЕЧНИКА У ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОМУ ОСЕРЕДКУ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ

Бережна Олена Валеріївна,

доктор технічних наук, професор,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0001-6205-1987

Малигіна Світлана Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Комп'ютерні інформаційні технології»
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0002-2622-5473

Бережний Максим Олександрович,

аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем,
інструментів та технологій
Донбаської державної машинобудівної академії

Пожидаєв Андрій Вікторович,

аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаської державної машинобудівної академії

Відновлення працездатності деталей та вузлів обладнання, що працює в умовах абразивного зношування, може бути досягнуто двома шляхами: заміною спрацьованих деталей новими або нарощуванням шарів відновлюючих та зміцнюючих покриттів на зношену поверхню до номінальних розмірів. Перший шлях є економічно менш вигідним через те, що витрати на запасні частини можуть сягати до 80 % від вихідної вартості обладнання. Застосування електроконтактного наплавлення композиційними матеріалами, коли на зношену поверхню наносять шар необхідної товщини, що має заздалегідь визначений рівень робочих характеристик, дозволяє ефективно вирішувати задачу подовження нормативного терміну служби технологічних вузлів обладнання. Фізико-механічні властивості покриттів (міцність зчеплення, зносостійкість, твердість) залежать від поведінки тугоплавких частинок шихтової композиції сердечника у поперечному перерізі шару. Тугоплавкі частинки не деформуються в процесі електроконтактного наплавлення, вступаючи під дією сили на ролик-електроді у фізичний контакт із в'язко-пластичними поверхневими шарами основного металу деталей. Специфіка виробництва композиційних матеріалів для електроконтактного наплавлення зносостійких покриттів зумовлює в осередку деформації наявність дроблених тугоплавких частинок осколкової форми, які можуть бути різним чином орієнтовані гранями або ребрами стосовно поверхні деталі. У представленій математичній моделі розглянуто поведінку дроблених тугоплавких частинок в осередку деформації на прикладі спільного впровадження суміжних частинок, представлених у вигляді ідеалізованих абсолютно жорстких клинів. Адекватність запропонованої моделі підтверджується зіставленням розрахункових даних та результатів експериментальних досліджень. Встановлено, що найбільша глибина впровадження спостерігається у разі введення до шихтової композиції сердечника як зносостійкого складника тугоплавких частинок у вигляді конусу. Аналіз одержаних експериментальних даних показав, що міцність зчеплення значно підвищується у разі впровадження тугоплавких часток у в'язко-пластичні поверхневі шари основного металу деталі.

Ключові слова: електроконтактне наплавлення, математична модель, підвищення зносостійкості, композиційне покриття.

Berezshna Olena, Malyhina Svitlana, Berezhniy Maksym, Pozhidaev Andriy. Mathematical modeling of the behavior of refractory particles of a powder core in a thermal deformation zone during surfacing

Restoration of the performance of parts and assemblies of equipment operating under conditions of abrasive wear can be achieved in two ways: by replacing worn parts with new ones or by building up layers of restoring and strengthening coatings on the worn surface to nominal dimensions. The first way is economically less profitable

due to the fact that the cost of spare parts can reach up to 80 % of the initial cost of the equipment. The use of electrocontact surfacing with composite materials, in which a layer of the required thickness is applied to the worn surface, which has a predetermined level of operating characteristics, allows you to effectively solve the problem of extending the standard service life of technological equipment assemblies. The physical and mechanical properties of the coatings (bonding strength, wear resistance, hardness) depend on the behavior of refractory particles of the charge composition to the core in the cross section of the layer. Refractory particles are not deformed in the process of electrocontact deposition, coming into physical contact with the viscoplastic surface layers of the base metal of the parts under the action of the force on the roller-electrode. The specifics of the production of composite materials for electrocontact deposition of wear-resistant coatings determine the presence of crushed refractory particles of fragmentary shape in the deformation center, which can be oriented in different ways by their faces or edges relative to the surface of the part. The presented mathematical model considers the behavior of crushed refractory particles in the deformation center using the example of joint introduction of adjacent particles, presented in the form of idealized absolutely rigid wedges. The adequacy of the proposed model is confirmed by comparing the calculated data and the results of experimental studies. It has been established that the greatest depth of introduction is observed when introducing refractory particles in the form of a cone into the charge composition as a core as a wear-resistant component. Analysis of the obtained experimental data showed that the bond strength is significantly increased when refractory particles are introduced into the visco-plastic surface layers of the base metal of the part.

Key words: electrocontact surfacing, mathematical model, increasing wear resistance, composite coating.

Вступ. Одним з основних шляхів підвищення надійності та довговічності виробів є застосування зносостійких покриттів. Зміцнення деталей шляхом нанесення покриттів дозволяє підвищити ресурс роботи агрегату при одночасному зниженні витрат легованих сталей [1–4]. Одним з ефективних способів нанесення покриттів є електроконтактне наплавлення, яке доцільно застосовувати при незначних втратах робочої поверхні шляхом їх нарощування до номінальних розмірів при мінімальному рівні термодинамічних збурень, що вносяться до стану основного металу. Раніше [5] було проведено математичне моделювання процесу електроконтактного наплавлення, проте невирішеним залишилося питання поведінки тугоплавких часток сердечника порошкового електрода при оптимізації енергосилових параметрів процесу та впливу форми часток шихтової композиції на міцність зчеплення нанесеного шару з поверхнею деталі. Тому представлена задача є актуальною.

Сутність електроконтактного наплавлення полягає у сумісній пластичній деформації приконтатного об'єму поверхні відновлюваної деталі та присадкового матеріалу, в результаті чого утворюється твердофазне з'єднання покриття з основним металом. Для підвищення зносостійкості шару як компонента шихтової композиції присадкового матеріалу використовують карбіди тугоплавких металів, які під дією навантаження впроваджуються у поверхневі шари відновлюваної деталі.

Методи та методики дослідження. В якості енергосилових параметрів використовували силу впровадження частинки шихти в поверхневі шари деталі в нейтральному перетині або в ділянці чистого ущільнення сердечника. При цьому

максимальне значення сили впровадження частинки можливе у разі дії максимальних нормальних контактних напружень в осередку деформації. Представимо тугоплавкі частинки шихтової композиції присадкового матеріалу у вигляді абсолютно жорстких клинів, а пластичні поверхневі шари металу деталі – як абсолютно гладку поверхню. Розрахунок спільного впровадження двох частинок можна розділити на два етапи: розрахунок процесу впровадження однієї тугоплавкої частинки; розрахунок власне процесу впровадження двох суміжних частинок у поверхневі шари основного металу деталі.

Перший етап розрахунку базується на методі побудови полів ліній ковзання, що дозволяє повною мірою врахувати двовірний характер пластичної формозміни (рис. 1).

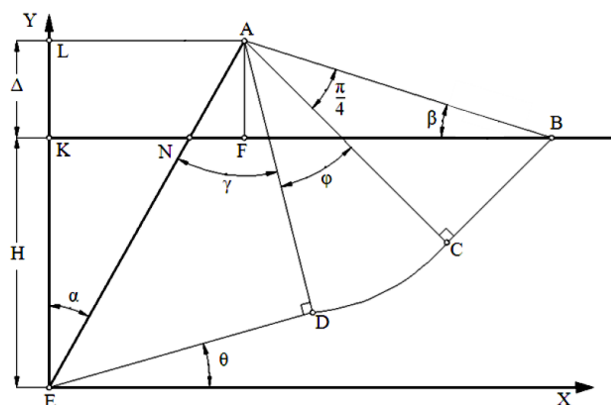


Рис. 1. Поля ліній ковзання при впровадженні тугоплавкої частинки у поверхню виробу в осередку деформації

Позначивши глибину впровадження частинки H та приймаючи за початок координат точку E (вершину клиноподібної тупоплавної частинки), визначимо координати особливої

точки A . Внаслідок відсутності стискування металу трикутники EKN та BAN є рівновеликими. Розіб'ємо трикутник BAN на два – ΔAFN та ΔAFB , проводячи з вершини A трикутника BAN перпендикуляр AF до сторони NB . З нерівності площ трикутників випливає співвідношення:

$$\Delta EKN = \Delta BAN;$$

$$\frac{H^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} = \frac{\Delta^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} + \frac{\Delta \cdot L_{BF}}{2}, \quad (1)$$

де α – напівкут при вершині частинки, град;

L_{BF} – довжина сторони BF , мм.

У рівнянні (1) дві невідомі величини – довжина сторони BF та шукана координата точки $A(\Delta)$. Визначимо довжину сторони AB – L_{AB} . Для цього розглянемо ΔAEN , ΔADE та ΔABC .

ΔAEN :

$$L_{EL} = H + \Delta; \quad \angle ALE = 90^\circ.$$

Звідки:

$$L_{AE} = \frac{L_{EL}}{\cos \alpha} = \frac{H + \Delta}{\cos \alpha}. \quad (2)$$

Розглянемо ΔADE :

$$\gamma = \frac{\arccos 2\mu}{2},$$

де μ – коефіцієнт пластичного тертя.

Звідки, враховуючи (2), одержимо:

$$L_{AD} = L_{AE} \cos \gamma = \frac{L_{EL} \cos \gamma}{\cos \alpha} = \frac{(H + \Delta) \cos \gamma}{\cos \alpha}.$$

З одержаних розрахунків випливає, що ΔABC є прямокутним та рівнобедреним, а отже:

$$L_{AB} = L_{AC} \sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}(H + \Delta) \cos \gamma}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

Для визначення довжини сторони FB розглянемо ΔABF :

$$AF \perp FB; \quad \sin \beta = \frac{\Delta}{L_{AB}}.$$

Враховуючи (3), одержимо:

$$L_{BF} = L_{AB} \cos \beta = \frac{\sqrt{2}(H + \Delta) \cos \gamma}{\cos \alpha} \times \cos \left(\arcsin \left(\frac{\Delta \cos \alpha}{\sqrt{2}(H + \Delta) \cos \gamma} \right) \right). \quad (4)$$

Підставивши рівняння (4) у (2), після перетворень одержимо:

$$\Delta^2 + \frac{\Delta \sqrt{2}(H + \Delta) \cos \gamma}{\sin \alpha} \times \cos \left(\arcsin \left(\frac{\Delta \cos \alpha}{\sqrt{2}(H + \Delta) \cos \gamma} \right) \right) - H^2 = 0.$$

Вирішивши одержане трансцендентне рівняння відносно єдиної невідомої, визначимо координати особливих точок:

$$A_y = H + \Delta; \quad A_x = A_y \operatorname{tg} \alpha; \quad B_y = H; \quad (5)$$

$$L_{AD} = L_{AC} = R = \frac{A_y \cos \gamma}{\cos \alpha}; \quad (6)$$

$$\beta = \arcsin \frac{\Delta}{R \sqrt{2}}; \quad (7)$$

$$B_x = A_x + R \sqrt{2} \cos \beta; \quad (8)$$

$$C_x = B_x - R \cos(\pi/4 - \beta); \quad (9)$$

$$C_y = B_y - R \sin(\pi/4 - \beta); \quad (10)$$

$$D_x = (H + \Delta) \sin \gamma \cos(\alpha - \gamma) / \cos \alpha; \quad (11)$$

$$D_y = -(H + \Delta) \sin \gamma \sin(\alpha - \gamma) \cos \alpha. \quad (12)$$

Оскільки точка E розташована на початку координат, то кут θ :

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{D_y}{D_x}. \quad (13)$$

Визначимо кут φ :

$$\varphi = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \gamma - \frac{\pi}{4} - \operatorname{arctg} \frac{\Delta}{B_x - A_x}. \quad (14)$$

Для силового розрахунку скористаємося властивостями полів ліній ковзання:

$$\sigma_E = 2k(1 + \varphi); \quad (15)$$

$$\sigma_{E_x} = \sigma_E - 2k \sin 2\theta; \quad (16)$$

$$\sigma_{E_y} = \sigma_E + 2k \sin 2\theta;$$

$$P_x = \sigma_{E_x} \cdot A_y - \tau \cdot A_x;$$

$$P_y = \sigma_{E_y} \cdot A_x - \tau \cdot A_y,$$

де $\tau = 2k - \mu$;

$2k$ – подвійний опір чистому зсуву матеріалу, що деформується, МПа.

З урахуванням (11)–(15) повна величина сили, що діє на частинку та є необхідною для її впровадження у пластичні поверхневі шари основного металу деталі, становить:

$$P = 2P_y b_k, \quad (17)$$

де $2b_k$ – повна ширина тугоплавкої частинки, мм.

Розрахунок спільного впровадження двох частинок шихтової композиції присадкового матеріалу (висотами H_1 та H_2 з кутами при вершинах α_1 і α_2 , відповідно) базується на розрахунку впровадження однієї частинки, проте має певні відмінності: поки впроваджується тільки одна частинка, а друга ще не досягла поверхневих шарів виробу, розрахунок проводиться за наведеним вище алгоритмом впровадження одиночної частинки у плоску поверхню; коли друга частинка також досягає поверхневих

шарів, обидві частинки розраховуються окремо також за наведеним алгоритмом; з появою точки Z_0 (рис. 2) відбувається перехід в іншу систему координат:

– для частинки, що знаходиться ліворуч:

$$A_{1y} = A_{1y} + (h_t - H_1), \quad B_{1y} = B_{1y} + (h_t - H_1);$$

– для частинки, що знаходиться праворуч:

$$A_{2x} = B - A_{2x}, \quad B_{2x} = B - B_{2x};$$

$$A_{2y} = A_{2y} + (h_t - H_2), \quad B_{2y} = B_{2y} + (h_t - H_2),$$

де $B = H_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + H_2 \operatorname{tg} \alpha_2$ – база, мм.

Координати особливої точки Z_0 визначають як точку перетину прямих $A_{10}B_1$ та $A_{20}B_2$, вирішуючи систему лінійних рівнянь:

$$k_1 \cdot x + b_1 = 0;$$

$$k_2 \cdot x + b_2 = 0;$$

$$k_1 = \frac{B_{1y} - A_{10y}}{B_{1x} - A_{10x}}, \quad k_2 = \frac{B_{2y} - A_{20y}}{B_{2x} - A_{20x}},$$

$$b_1 = A_{10y} - A_{10x} \cdot k_1, \quad b_2 = A_{20y} - A_{20x} \cdot k_2.$$

Необхідно розрахувати надлишок площі – площу трикутника $B_1B_2Z_0$:

$$S_{\Delta B_1B_2Z_0} = \frac{L_{B_1B_2} \cdot Z_{0y}}{2} = \frac{(B_{1x} - B_{2x}) Z_{0y}}{2}. \quad (18)$$

Перемістивши одержаний надлишок площ вгору, одержимо фігуру $A_{10}A_{11}Z_1A_{21}A_{20}Z_0$, рівновелику трикутнику $B_1B_2Z_0$. При цьому для фігури $A_{10}A_{11}Z_1A_{21}A_{20}Z_0$ приймають такі допущення: $A_{11}Z_1 \parallel A_{10}Z_0$; $A_{21}Z_1 \parallel A_{20}Z_0$; отже, точка Z_0 переходить у точку Z_1 по вертикалі. Виразимо площу одержаної фігури з рівняння, прийнявши $Z_1y - Z_0y = \delta$:

$$S_{A_{10}A_{11}Z_1A_{21}A_{20}Z_0} = S_{A_{10}P_1Z_1P_2A_{20}Z_0} - S_{\Delta A_{10}P_1A_{11}} - S_{\Delta A_{20}P_2A_{21}}; \quad (19)$$

Площа фігури $A_{10}P_1Z_1P_2A_{20}Z_0$ визначається, з огляду на рівняння обмежуючих її ліній та межі інтегрування (враховуючи прийняті вище

допущення): рівняння лінії $A_{10}Z_0$: $y = k_1 \cdot x + b_1$; рівняння лінії $A_{11}Z_1$: $y = k_1 \cdot x + b_1 + \delta$; нижня межа інтегрування – A_{1x} , верхня межа інтегрування – Z_0x ; рівняння лінії $A_{20}Z_0$: $y = k_2 \cdot x + b_2$; рівняння лінії $A_{21}Z_1$: $y = k_2 \cdot x + b_2 + \delta$; нижня межа інтегрування – Z_0x , верхня межа інтегрування – A_{2x} . Тоді площа трикутника $A_{10}P_1A_{11}$:

$$\angle A_{10}P_1A_{11} = \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \operatorname{abs}(\arctg(k_1));$$

$$\angle P_1A_{11}A_{10} = \psi_1 = \pi - \alpha_1 - \theta_1;$$

$$L_{A_{10}A_{11}} = \frac{\delta \sin \theta_1}{\sin \psi_1};$$

$$S_{\Delta A_{10}P_1A_{11}} = \frac{\sin \theta_1 \sin \alpha_1}{2 \sin \psi_1} \delta^2.$$

Аналогічно для трикутника $A_{20}P_2A_{21}$:

$$\angle A_{20}P_2A_{21} = \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \operatorname{abs}(\arctg(k_2));$$

$$\angle P_2A_{21}A_{20} = \psi_2 = \pi - \alpha_2 - \theta_2;$$

$$L_{A_{20}A_{21}} = \frac{\delta \sin \theta_2}{\sin \psi_2}; \quad S_{\Delta A_{20}P_2A_{21}} = \frac{\sin \theta_2 \sin \alpha_2}{2 \sin \psi_2} \delta^2.$$

Площа фігури дорівнює:

$$S_{A_{10}A_{11}Z_1A_{21}A_{20}Z_0} = \int_{A_{1x}}^{Z_{0x}} \int_{k_1 \cdot x + b_1}^{k_1 \cdot x + b_1 + \delta} dy dx + \int_{Z_{0x}}^{A_{2x}} \int_{k_2 \cdot x + b_2}^{k_2 \cdot x + b_2 + \delta} dy dx - \frac{\delta^2 \sin \theta_1 \sin \alpha_1}{2 \sin \psi_1} - \frac{\delta^2 \sin \theta_2 \sin \alpha_2}{2 \sin \psi_2}.$$

Оскільки $S_{A_{10}A_{11}Z_1A_{21}A_{20}Z_0} = S_{\Delta B_1B_2Z_0}$, то, прирівнявши праві частини рівнянь (18) і (19), спростивши отриманий результат, одержимо:

$$\alpha \delta^2 + b \delta + c = 0;$$

$$a = \frac{\sin \theta_1 \cdot \sin \alpha_1}{2 \sin \psi_1} + \frac{\sin \theta_2 \cdot \sin \alpha_2}{2 \sin \psi_2},$$

$$b = -(A_{2x} - A_{1x}), \quad c = \frac{(B_{1x} - B_{2x}) \cdot Z_{0y}}{2}$$

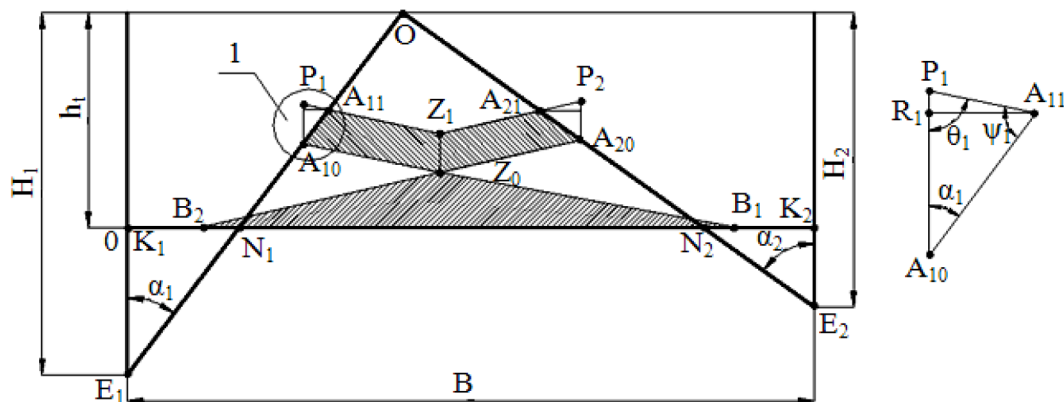


Рис. 2. Розрахункова схема спільного впровадження двох частинок у поверхневі шари деталі в осередку деформації

Рішення одержаного рівняння можна знайти у вигляді:

$$\delta = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Визначивши величину зсуву δ , знайдемо координати точок A_{11} , A_{21} та Z_1 :

$$A_{11x} = A_{10x} + A_{10} A_{11} \cdot \sin \alpha_1 = A_{10x} + \frac{\delta \sin \theta_1 \sin \alpha_1}{\sin \psi_1};$$

$$A_{11y} = A_{10y} + A_{10} A_{11} \cdot \cos \alpha_1 = A_{10y} + \frac{\delta \sin \theta_1 \cos \alpha_1}{\sin \psi_1};$$

$$A_{21x} = A_{20x} - A_{20} A_{21} \cdot \sin \alpha_2 = A_{20x} + \frac{\delta \sin \theta_2 \sin \alpha_2}{\sin \psi_2};$$

$$A_{21y} = A_{20y} + A_{20} A_{21} \cdot \cos \alpha_2 = A_{20y} + \frac{\delta \sin \theta_2 \cos \alpha_2}{\sin \psi_2};$$

$$Z_{1y} = Z_{0y} + \delta.$$

Визначимо величину ht . Виходячи з рівності об'ємів впроваджених частинок та витиснутого металу поверхневих шарів деталі:

$$S_{\Delta E_1 K_1 N_1} + S_{\Delta E_2 K_2 N_2} = S_{\Delta N_1 O N_2},$$

або в прийнятих позначеннях:

$$\frac{(H_1 - h_t)^2 \operatorname{tg} \alpha_1}{2} + \frac{(H_2 - h_t)^2 \operatorname{tg} \alpha_2}{2} =$$

$$h_t \left[\frac{(H_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + H_2 \operatorname{tg} \alpha_2) - (H_1 - h_t) \operatorname{tg} \alpha_1 -}{2} \right. \\ \left. - (H_2 - h_t) \operatorname{tg} \alpha_2 \right].$$

Одержавши координати особливих точок та величину ht , силовий розрахунок виконували за формулами (5)–(17), попередньо повернувшись до системи координат, яка використовувалась

під час розрахунку впровадження однієї тугоплавкої частинки.

Результати. З метою перевірки адекватності представленої математичної моделі поведінки тугоплавких часток шихтової композиції сердечника присадкового матеріалу проведено експериментальні дослідження впровадження ідеалізованої тугоплавкої частинки з різними кутами при вершині. Аналіз одержаних даних показав, що розрахована згідно з розробленою математичною моделлю сила є нижньою межею діючої сили на ролик-електроді в процесі електроконтактного наплавлення, необхідної для впровадження та закріплення тугоплавких частинок у поверхневих шарах деталі у термодформацийному осередку (рис. 3).

Результати чисельної реалізації математичної моделі впровадження тугоплавких частинок сердечника у поверхневі шари деталі, розігріті до пластичного стану, показали, що найбільша глибина впровадження спостерігається у разі введення до шихтової композиції сердечника як зносостійкого складника тугоплавких частинок у вигляді конусу, а найменша – у разі введення шароподібних тугоплавких частинок. Аналіз одержаних експериментальних даних показав, що міцність зчеплення наплавленого шару великою мірою визначається поведінкою тугоплавких часток сердечника композиційного матеріалу. Міцність зчеплення значно підвищується у разі впровадження тугоплавких часток у в'язко-пластичні поверхневі шари основного металу деталі.

Висновки. Проведено математичне моделювання поведінки часток при електроконтактному

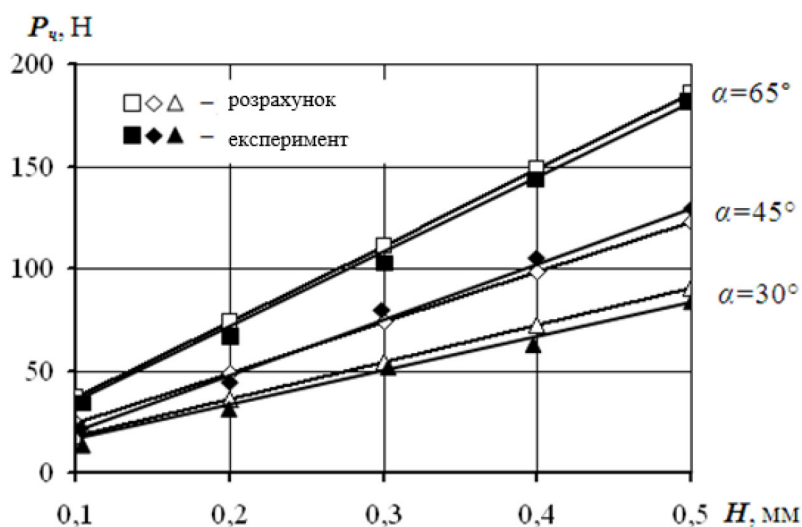


Рис. 3. Зміна сили $P_{\text{ч}}$, що діє на тугоплавку частинку і необхідна для її впровадження на глибину H у поверхневий шар основного металу деталі, залежно від кута α при вершині гострокутної частинки

наплавленні композиційними матеріалами і встановлено оптимальні геометричні параметри тугоплавких частинок шихтової композиції присадкового матеріалу. Одержані результати дозволили розробити практичні рекомендації з підготовки шихтової композиції для присадкового матеріалу за гранулометричним складом, використовуючи тим самим можливість

підвищення міцності зчеплення між компонентами шихти та поверхневими шарами основного металу виробу, який піддається відновленню або зміцненню, що дозволяє в умовах електроконтактного наплавлення композиційних матеріалів забезпечити підвищення зносостійкості деталей та виробів, які працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system / Prysyazhnyuk P., Ivanov O., Matvienkiv O., Marynenko S., Korol O., Koval I. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.014>
2. Hamed M., Atashparva M. A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. *Welding in the World*. 2017. Vol. 61. P. 269–290. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4>
3. Eduard P. Gribkov, Alexander V. Perig. Research into the process of producing powder tapes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. № 85 (9). P. 2887–2900. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8714-1>
4. Dobrzański L. A., Dobrzański L. B., Dobrzańska-Danikiewicz A. D. Manufacturing technologies thick-layer coatings on various substrates and manufacturing gradient materials using powders of metals, their alloys and ceramics. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 99. № 1. P. 14–41. DOI 10.5604/01.3001.0014.1598
5. Berezshnaya O. V., Kassov V. D., Gribkov E. P. Combined Technology for the Parts Recovery Operating in Stress Factor Conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340326835_Combined_Technology_for_the_Parts_Recovery_Operating_in_Stress_Factor_Conditions

REFERENCES:

1. Prysyazhnyuk, P., Ivanov, O., Matvienkiv, O., Marynenko, S., Korol, O., & Koval, I. (2022). Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system. *Procedia Structural Integrity*, 36, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.014>
2. Hamed, M., & Atashparva, M. (2017). A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. *Welding in the World*, 61, 269–290. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4>
3. Eduard P. Gribkov, & Alexander V. Perig (2016). Research into the process of producing powder tapes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9), 2887–2900. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8714-1>
4. Dobrzański, L. A., Dobrzański, L. B., & Dobrzańska-Danikiewicz, A. D. (2020). Manufacturing technologies thick-layer coatings on various substrates and manufacturing gradient materials using powders of metals, their alloys and ceramics. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 99(1), 14–41. DOI: 10.5604/01.3001.0014.1598
5. Berezshnaya, O. V., Kassov, V. D., & Gribkov, E. P. (2020). Combined Technology for the Parts Recovery Operating in Stress Factor Conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/340326835_Combined_Technology_for_the_Parts_Recovery_Operating_in_Stress_Factor_Conditions

Стаття надійшла: 12.08.2025
Стаття прийнята: 28.08.2025
Опублікована: 10.11.2025

