

О.Й. Мажейка, проф., канд.техн.наук, С.І. Маркович, доц., канд.техн.наук,
Ю.В. Рябоволик, асп.

Кіровоградський національний технічний університет

Конструкція головки для нанесення зносостійких електродугових покриттів на внутрішні поверхні деталей сільськогосподарської техніки

В статті здійснено розрахунок струмозмінних направляючих електродугового розпилювача для нанесення зносостійких покриттів на внутрішні поверхні корпусних деталей сільськогосподарської техніки. При цьому отримано рівняння, що описують оптимальну форму кривизни направляючих з урахуванням фізико-механічних властивостей і розмірів порошкових та суцільнотягнутих електродних дротів.

зносостійкі покриття, вісь направляючих, порошковий дріт

Аналіз літературних джерел [1, 2] показав, що конструкції розпилюючих головок для нанесення електродугових покриттів на внутрішні циліндричні поверхні деталей складні та потребують частих регулювань на оптимальні режими роботи, споживають велику кількість стисненого повітря, що приводить до суттєвого окиснення краплин при розпиленні електродного дроту і не дозволяє одержати концентровану пляму напиленого металу та сприяє появі в покриттях великих розтягуючих напружень. Все це погіршує механічні властивості напиленого покриття, зокрема знижує його адгезію та когезію. Крім того вказані конструкції не дозволяють наносити покриття при співвідношенні діаметру та довжини отвору 1/2 і більше за один установ.

Для вирішення поставленого завдання вважатимемо, що дріт моделюється консольно затисненою балкою. Дію на дріт направляючої замінимо розподіленим навантаженням $q(x)$ (рис. 1. б). Очевидно, що рівномірний притиск дроту до стінок направляючої буде забезпечений, якщо $q(x)=const$. Тоді розрахувавши форму пружної лінії балки, за цієї умови визначимо необхідну форму направляючої, яка забезпечує рівномірний притиск дроту.

Як показали попередні розрахунки, неможливо добитися прийнятних геометричних параметрів головки електродугового розпилювача залишаючись в зоні пружних деформацій дроту. Тому, необхідно вирішувати пружньо-пластичну задачу на основі моделі ідеально-пластичного матеріалу [4]. Максимальний згинальний момент, згідно [5], діє в місці закладення (т.0).

Враховуючи останню обставину, можна записати рівняння розвантаження перетину дроту при його проходженні по направляючій [4]:

$$M^* - M(x) = EI(\chi^* - \chi(x)), \quad (1)$$

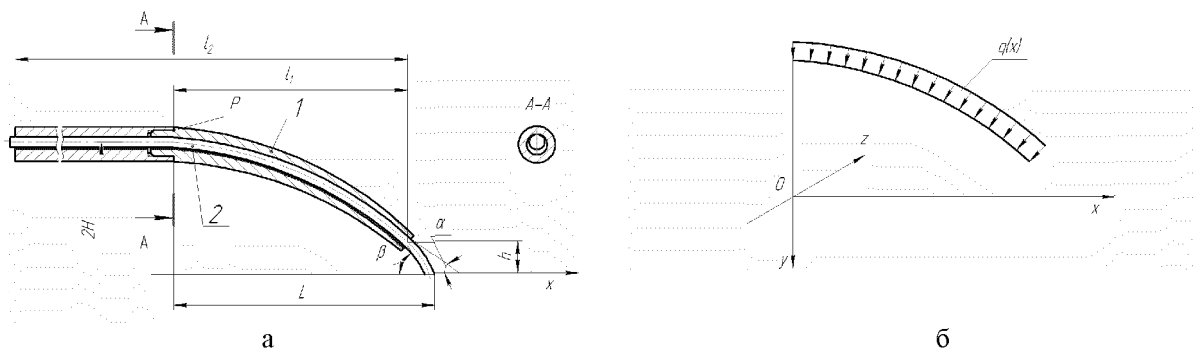
де M^* - максимальний згинальний момент (в т.0);

$M(x)$ - згинальний момент в довільному перетині x ;

E - модуль Юнга матеріалу дроту;

I - момент інерції перетину дроту;

χ, χ^* - відповідно кривизна дроту в нульовому (0) і довільному (x) перетинах.



1 – направляюча; 2 – дріт; $2H$ – відстань між дротами на паралельних відрізках; β – кут сходження дротів; α – кут виходу дроту з направляючої; h – виліт дроту, мм; L – відстань від площини, яка проходить через закріплені кінці направляючих, до точки сходження дроту, мм; l_1 – довжина направляючої, мм; l_2 – довжина системи, мм

Рисунок 1- Схема для розрахунку направляючої

Якщо прийняти за вісі координат головні центральні вісі, то можна записати:

$$\chi_z = \frac{M_z}{EI_z}, \quad \chi_y = \frac{M_y}{EI_y}, \quad e_0 = \frac{N_x}{EF}. \quad (2)$$

Тепер формула для напружень буде мати наступний вигляд:

$$\sigma = -\frac{M_z \cdot y}{I_z} + \frac{M_y \cdot z}{I_y} + \frac{N_x}{F}. \quad (3)$$

При згині в головній площині uox зв'язок з кривизною в цій площині можна записати наступним чином:

$$\frac{1}{\rho_z} = -\frac{M_z}{EI_z}. \quad (4)$$

Викривлена вісь зігнутої направляючої (рис. 1) являє собою деяку криву в площині uox ; задаючи переміщення точок початково прямої вісі направляючої, яка співпадає в початковому стані з віссю x , в виді функції $v(x)$, одержимо:

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{v''}{(1 + v'^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (5)$$

Тут штрихи означають похідні по x , знак плюс або мінус вибирається в залежності від того, яку кривизну ми вважаємо додатньою. В випадку, зображеному на рис. 2а, згинальний момент додатній.

Випуклість зігнутої вісі обернена вгору, відповідно друга похідна v'' теж додатня. Тому точне диференціальне рівняння зігнутої вісі направляючої:

$$\frac{v''}{(1 + v'^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{M_z}{EI_z}. \quad (6)$$

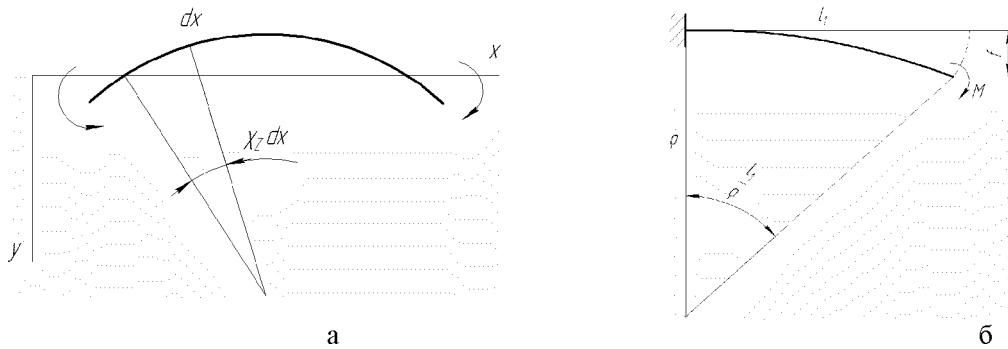


Рисунок 2- Схема моментів сил

Інтегрування цього нелінійного диференціального рівняння досить складне, але можливе. Як правило балки (направляючі), які являють собою несучі елементи конструкцій, отримують лише малі прогини. Тому тангенс кута нахилу дотичної до пружної лінії v' малий, а квадратом його можна знехтувати в порівнянні з одиницею. Таким чином, в подальшому будемо використовувати наступне наближене рівняння:

$$EI_z v'' = M_z(x). \quad (7)$$

Продиференціювавши рівняння (7) два рази по x , одержимо:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_z \frac{d^2 v}{dx^2} \right) = q(x). \quad (8)$$

Функція, яка фігурує в правій частині, може бути узагальненою функцією типу дельта-функції (зосереджена сила) або похідною від дельта-функції (зосереджений момент).

Спробуємо тепер вияснити точність наближеного рівняння (7). Нехай затиснена направляюча довжини l_1 напружена моментом M (рис. 2б).

Балка зігнеться по дузі кола і прогин на кінці буде дорівнювати:

$$f = \rho \left(1 - \cos \frac{l_1}{\rho} \right). \quad (9)$$

Розкладемо косинус в ряд, обмежившись трьома членами розкладання:

$$\cos \frac{l_1}{\rho} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{l_1}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{l_1}{\rho} \right)^4 - \dots$$

Вираз для f одержуємо наступний:

$$f = \frac{1}{2} \frac{l_1^3}{\rho^3} - \frac{1}{24} \frac{l_1^5}{\rho^5} + \dots \text{або} \quad f = \frac{1}{2} \left(\frac{M \cdot l_1}{EI_z} \right) - \frac{1}{24} \left(\frac{M \cdot l_1}{EI_z} \right)^3 + \dots \quad (10)$$

Інтегруючи рівняння (7) з врахуванням граничних умов $v(0) = v'(0) = 0$, одержимо:

$$\frac{f_0}{l_1} = \frac{1}{2} \frac{M l_1}{EI_z}.$$

Тут через f_0 позначена величина прогину, яка отримується по наближеній теорії. Точний (до величини третього порядку) вираз прогину можна представити наступним чином:

$$\frac{f}{l_1} = \frac{f_0}{l_1} - \frac{1}{3} \left(\frac{f_0}{l_1} \right)^3. \quad (11)$$

Відносна похибка при визначенні прогину:

$$\frac{|f - f_0|}{f_0} = \frac{1}{3} \left(\frac{f_0}{f} \right)^3.$$

Якщо задовільняємося при визначенні прогину похибкою в 3%, а більша точність не потрібна, так як похибка при визначенні модуля пружності зазвичай буває великою, то вважаючи, що:

$$\frac{1}{3} \left(\frac{f_0}{f} \right)^3 = \frac{3}{100}, \quad \text{знайдемо} \quad \frac{f_0}{f} = 0.3.$$

Таким чином, прогини балок (направляючих), які використовуються в якості несівних елементів конструкцій завжди набагато менше ніж 30% від довжини, тому для точного визначення $q(x)$ для накінецьників розпилювальної головки може бути використана формула (8).

Аналізуючи рівняння (8) і враховуючи геометричні розміри направляючого накінецьника при подальших розрахунках можна вважати, що $q(x) = \text{const} = q$

При цій умові маємо:

$$M(x) = M(0) = \frac{1}{2} q l^2, \quad (12)$$

$$M^* = M(0) = \frac{1}{2} q l^2, \quad (13)$$

де l – довжина направляючої, мм.

Для визначення $\chi(x)$, що входить в рівняння (1), заздалегідь знайдемо χ^* . Розглянемо поперечний перетин зігнутої осі дроту і запишемо вираз для сумарного моменту від напружень, що діють в перетині [4]:

$$M = \int_F \sigma(p) y(p) dF \quad (14)$$

де $\sigma(p)$ - напруження в довільній точці p перетину;

$y(p)$ - вертикальна координата p .

Оскільки напруження пов'язані з деформацією, то вводимо позначення

$$\sigma(P) = \varphi(e(P)), \quad (15)$$

де $e(P)$ - деформація перетину в точці P .

Введемо також функцію $B(y)$ для ширини перетину на відстані y від площини xoz ($-R \leq y \leq R$, де R - радіус дроту). Враховуючи область визначення $B(y)$, розглянемо її як функцію безрозмірної координати $B(y/R)$.

Приймаючи гіпотезу плоских перетинів [5, 6], отримали вираз для кривизни пружної лінії, пов'язаний з деформаціями будь-якого волокна в перетині

$$e = \chi y, \quad (16)$$

або з деформацією крайнього волокна

$$e_0 = \chi R. \quad (17)$$

Тоді, виходячи із систематичності перетину вирішимо рівняння (14) у вигляді:

$$|M| = 2 \int_0^R \varphi(\chi y) b(y/R) y dy, \quad (18)$$

або

$$\frac{M}{2R^2} \frac{1}{e_0^2} \int_0^{e_0} \varphi(e) b\left(\frac{e}{e_0}\right) e de = \Phi(e_0). \quad (19)$$

Таким чином, визначивши $\varphi(e_0)$, використовуючи вираз (19), можна зв'язати M і e_0 , а потім одержати співвідношення між M і χ .

Вважаючи деформацію будь-якого перерізу дроту ідеально пластичною [4], визначимо $\varphi(e)$ наступним чином:

$$\varphi(e) = \begin{cases} Ee, & \text{при } e \leq \frac{\sigma_T}{E} = e_T \\ \sigma_T, & \text{при } e > \frac{\sigma_T}{E} = e_T \end{cases}, \quad (20)$$

де σ_T - границя текучості матеріала дроту.

В подальшому будемо розглядати два випадки – дріт суцільного поперечного перерізу і порошковий дріт:

а) дріт суцільного поперечного перерізу.

Враховуючи, що

$$b\left(\frac{y}{R}\right) = 2R\sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} \quad (21)$$

одержуємо

$$\frac{M_x}{2R^2} = \begin{cases} \frac{1}{e_0^2} \int_0^{e_0} Ee 2R \sqrt{1 - \left(\frac{e}{e_0}\right)^2} e de, & \text{при } e \leq e_T \\ \frac{1}{e_0^2} \int_0^{e_0} \sigma_T 2R \sqrt{1 - \left(\frac{e}{e_0}\right)^2} e de, & \text{при } e > e_T \end{cases}. \quad (22)$$

Визначаючи інтеграли, які входять у (22), маємо

$$M_x = \begin{cases} \frac{\pi R^3 E e_0}{4}, & e_0 \leq e_T \\ R^3 E e_0 \left[\frac{1}{2} \arcsin \frac{e_T}{e_0} + \left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3} \left(\frac{e_T}{e_0} \right)^2 \right) \frac{e_T}{e_0} \sqrt{1 - \left(\frac{e_T}{e_0} \right)^2} \right], & e_0 > e_T \end{cases}, \quad (22a)$$

або, позначивши

$$\chi_T = \frac{e_T}{R} = \frac{\sigma_T}{ER},$$

одержуємо вираз для визначення згинального моменту в довільному перерізі балки.

$$M_x = \begin{cases} \frac{\pi R^3 E \chi}{4}, & \chi \leq \chi_T \\ R^4 E \chi \left[\frac{1}{2} \arcsin \frac{\chi_T}{\chi} + \left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3} \left(\frac{\chi_T}{\chi} \right)^2 \right) \frac{\chi_T}{\chi} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi_T}{\chi} \right)^2} \right], & \chi > \chi_T \end{cases}; \quad (23)$$

б) порошковий дріт.

Позначивши внутрішній радіус оболонки дроту через r , одержимо

$$B(y) = \begin{cases} 2(\sqrt{R^2 - y^2} - \sqrt{r^2 - y^2}), & \text{при } y < r \\ 2\sqrt{R^2 - y^2}, & \text{при } r < y < R \end{cases}. \quad (24)$$

Тому

$$\begin{aligned}
 M_x = & 2 \int_0^R \varphi(\chi y) b\left(\frac{y}{R}\right) y dy = 2 \int_0^r \varphi(\chi y) 2 \left[R \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} - r \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2} \right] y dy + \\
 & + 2 \int_r^R \varphi(\chi y) 2 R \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} y dy = 2 \int_0^R \varphi(\chi y) 2 R \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} y dy - \\
 & - 2 \int_0^r \varphi(\chi y) 2 r \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2} y dy
 \end{aligned} \quad (25)$$

Введемо позначення:

$$e = \chi y; \quad e_r = \chi r; \quad e_x = \chi R;$$

тоді

$$M_x = \frac{2R^2}{e_R^2} \int_0^{e_R} \varphi(e) 2R \sqrt{1 - \left(\frac{e}{e_R}\right)^2} e de - \frac{2r^2}{e_r^2} \int_0^{e_r} \varphi(e) 2r \sqrt{1 - \left(\frac{e}{e_r}\right)^2} e de. \quad (26)$$

Використовуючи (20) і виконуючи нескладні математичні перетворення одержуємо:

$$\begin{aligned}
 M_x = & \frac{\pi R^4 E \chi}{4} - \frac{\pi r^4 \chi}{4}, \text{ при } \chi < \frac{e_r}{R}; \\
 M_x = & \frac{\pi R^4 E \chi}{4} - r^4 E \chi \left[\frac{1}{2} \arcsin \frac{\chi_{Tr}}{\chi} + \left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3} \left(\frac{\chi_{Tr}}{\chi} \right)^2 \right) \frac{\chi_{Tr}}{\chi} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi_{Tr}}{\chi} \right)^2} \right], \text{ при } \frac{e_r}{R} < \chi < \frac{e_r}{r}; \\
 M_x = & R^4 E \chi \left[\frac{1}{2} \arcsin \frac{\chi_{Tr}}{\chi} + \left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3} \left(\frac{\chi_{Tr}}{\chi} \right)^2 \right) \frac{\chi_{Tr}}{\chi} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi_{Tr}}{\chi} \right)^2} \right] - \\
 & - r^4 E \chi \left[\frac{1}{2} \arcsin \frac{\chi_{Tr}}{\chi} + \left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3} \left(\frac{\chi_{Tr}}{\chi} \right)^2 \right) \frac{\chi_{Tr}}{\chi} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi_{Tr}}{\chi} \right)^2} \right], \\
 & \text{при } \chi > \frac{e_r}{r}
 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{де } \chi_{Tr} = \frac{e_r}{r}, \quad \chi_{TR} = \frac{e_r}{R}.$$

Перепишемо рівняння (1) з врахуванням (12) і (13) в наступному виді:

$$\chi(x) = \chi^* - \frac{qx(2e - x)}{2Ey}. \quad (28)$$

Вважаючи, що $y''(x) = \chi(x)$ [6], одержуємо

$$y(x) = \chi \frac{x^2}{2} - \frac{qe}{Ey} \frac{x^3}{6} + \frac{q}{EI} \frac{x^4}{24} + Ax + B, \quad (29)$$

де A і B – довільна стала (визначається з граничних умов).

З врахуванням (рис.6.1) ($y(0) = -H \Rightarrow b = -H$; $y''(0) = 0 \Rightarrow A = 0$) вираз (29)

приймає вигляд

$$y(x) = \chi \frac{x^2}{2} - \frac{qe}{Ey} \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{q}{EI} \frac{x^4}{24} - H. \quad (30)$$

Крім того, виходячи з конструктивних міркувань можна записати ще дві умови:

$$y(e) = \chi^* \frac{e^2}{2} - \frac{qe^4}{8EI} - H = -h, \quad (31)$$

$$y'(e) = \chi^* e - \frac{qe^3}{2EI} = \alpha. \quad (32)$$

Вводячи позначення ρ для радіуса залишкової кривизни дроту

$$\rho = \frac{1}{\chi(e)} = \frac{1}{y''(e)} = \frac{1}{\chi^* - \frac{3qe^2}{2EI}} \quad (33)$$

і проводячи нескладні геометричні перетворення, одержуємо додаткові вирази, які зв'язують конструктивні параметри металізатора:

$$\alpha = e - \rho \sin \alpha + \sqrt{\rho^2 \sin^2 \alpha - 2h\rho \cos \alpha}, \quad (34)$$

$$\beta = \alpha + \frac{1}{2\rho} \sqrt{h^2 + (\alpha - e)^2}. \quad (35)$$

Таким чином, отримана система рівнянь (31 - 35), що включає також залежно від виду дроту рівняння (23), або (27). Задаючись геометричними параметрами конструкції електродугового розпилювача L, h, β і H (рис. 1), а також геометрією перерізу дроту з властивостями його матеріалу E і σ_T , можна визначити параметри χ, q , і l_l . Потім, підставляючи задані і розраховані величини в рівняння (30) отримуємо рівняння, що описують оптимальну форму кривої направляючих.

Для перевірки отриманих теоретичних залежностей були відібрані дроти декількох марок: Св-08, 65Г і розроблені авторами порошкові дроти для наплення зносостійких покриттів, що піддаються обробці лезовим інструментом [7]. Фізико-механічні властивості дротів вибрані з довідкової літератури [3]. Розрахункові конструктивні параметри струмознімного пристрою електродугового розпилювача для вказаних дротів приведені в таблиці 1 ($H = 45$ мм для серійного електродугового розпилювача ЭМ-17, діаметр дроту $d = 2$ мм).

Таблиця 1 – Розрахункові параметри головки електродугового розпилювача

Марка дроту	Параметри				
	h , мм	L , мм	l_l , мм	β , °	α , °
Св-08	10	118	105	38	30
65Г	10	143	125	29	26
Порошковий дріт	10	76	70	59	45

Використовуючи дані таблиці 1 і рекомендації [3], запишемо емпіричні рівняння для направляючих електродугового розпилювача оптимальної форми:

- дріт Св-08

$$y = 3.22x^4 - 1.45x^3 + 3.62x^2 - 0.07; \quad (36)$$

- дріт 65Г

$$y = 4.38x^4 - 2.14x^3 + 3.22x^2 - 0.07; \quad (37)$$

- порошковий дріт

$$y = 14.19x^4 - 3.78x^3 + 1.05x^2 - 0.07. \quad (38)$$

На основі одержаних рівнянь будуємо вишукувані криві (рис.2). Їх аналіз показує, що існують суттєві відмінності в формі кривих струмознімного пристрою електродугового розпилювача для різних дровових матеріалів. Найбільша кривизна

направляющих одержана для порошковых дров, а наименша для дров зі сталі 65Г.

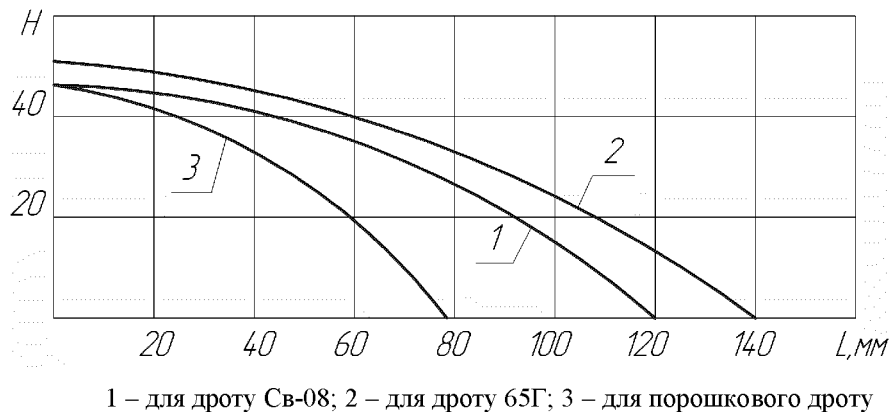


Рисунок 2 – Оптимальна форма направляющих электродугового распиловача

На основі отриманих даних розроблена конструкція электродугового распиловача для нанесення зносостійких покриттів на внутрішні поверхні корпусних деталей.

Список літератури

1. А.С.№925407. Оpubл.07.05.1982. бюл.№17. Электродуговой распылитель. В.Г. Кулешов, М.Г. Дребезгин, Р. Хахимов, А.З. Шарипов, Г.П.Панкин, Н.И. Латынин.
2. А.С.№111 308103. Оpubл.01.06.1971. бюл.№21. Распылительная головка к электрометаллизатору. Ю.А. Грызлов, З.Д. Макаева, А.И. Пономарев, Е.А.Губанова, В.В.Победоносцев.
3. Справочник металлиста /Под ред. А.Г.Рагштадта, В.А.Брострема. – т.2. – М.: Машиностроение, 1976. – 718 с.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1980. – 712 с.
5. Ицкович Г.М. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1968. – 538 с.
6. Сопротивление материалов / Под ред. акад. АН УССР Писаренко Г.С. – 5-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 775 с.,
7. Пат. № 42414 У, МПК(2009) В23К 35/24. Порошковый дріт для одержання відновних электродуговых покриттів, придатних для обробки лезовим інструментом./ В.І. Похмурський, М.М. Студент, С.І. Маркович, О.Й. Мажейко, Ю.В. Рябоволик. Заявл.10.07.2009;Оpubл.бюл. №13

О. Мажейка, С. Маркович, Ю. Рябоволик

Конструкция головки для нанесения износостойких электродуговых покрытий на внутренние поверхности деталей сельскохозяйственной техники

В статье осуществлен расчет токоснимающих направляющих электродугового распылителя для нанесения износостойких покрытий на внутренние поверхности корпусных деталей сельскохозяйственной техники. При этом получены уравнения, которые описывают оптимальную форму кривизны направляющих с учетом физико-механических свойств и размеров порошковых и цельнотянутых электродных проволок.

О. Mazheyka, S. Markovich, Y. Ryabovolik

The calculation of sending arc nebulizer for causing of wear proof coverages on the internal surfaces of cabinet-type details of agrarian technique is carried out in the article. Equalizations which describe the optimum form of curvature sending taking into account physical and mechanical properties and sizes of powder-like and continuous electrodes are thus got.

Одержано 22.09.09