

UDC 621.793.927.7

THEORETICAL RESEARCH OF THE EFFECT OF ROTATIONAL MOTION ON THE SHAPE OF SURFACE OF THE DEPOSITED LAYER

Mykhailo Mykhailyshyn; Volodymyr Havryliuk; Cheslav Pulka

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Summary. Different methods of surfacing are using to strengthen machine parts. The process of simultaneous induction surfacing consider in the article. The surfacing will perform with using simultaneous centrifugal rotation compared to the traditional surfacing scheme. The disk is located in a fixed position during the entire surfacing process according to the traditional scheme. The rotational movement is carrying out with a certain angular velocity at the time of fusion of the metal layer. The working time of the part increased due to centrifugal rotation. Because the layer of molten metal moves to the edge of the part, increasing its volume. The edge of the part receives the greatest load to the moment of operation.

Key words: molten metal, steel disk, drop, centrifugal rotation, angular velocity.

https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.117

Received 05.04.2022

Statement of the problem. Induction surfacing has found wide application in various branches of the national economy. In agricultural engineering, thin steel parts, such as knives and cutters, are welded with various powdered hard alloys [1–3]. To ensure the appropriate shape of the deposited roller and self-sharpening in the process of their operation, this method is constantly being improved in the directions of increasing the productivity of the depositing process, wear resistance, saving electricity, and stability of the deposited metal layer thickness [1].

Analysis of known experimental studies. The authors developed a technology of simultaneous induction surfacing of thin steel disks over the entire working surface with wear-resistant powder alloys [1–3], taking into account the shielding of thermal and electromagnetic fields [1, 4, 5], which allows saving electricity and shortening surfacing time. In paper [6], a mathematical model of the movement of a drop of liquid metal on the surface of a rotating steel disk was developed. It allows mathematical describing the studied particle of molten metal, namely its coordinates, trajectory and relative speed of movement at a particular moment in time at a given initial position and angular velocity disk rotation.

Formulation of the task. In [7, 8], the processes occurring in a liquid welding bath during electron beam re-melting without disk rotation is considered, where the movement of liquid metal inside the deposited layer is not taken into account. It is of interest to study the influence of angular velocity on the geometric shape of the roller, which directly affects its distribution in the surfacing zone, as well as the uniformity of the thickness of the surfacing layer over the entire working surface of the disc.

The objective of the article is to study the shape of the deposited roller depending on the thickness of the deposited metal layer and the angular speed of rotation of the circular disks, in time of the beginning of the powdery hard alloy melting.

In Fig. 1, a disk with a welded roller using centrifugal rotation is shown. During induction welding, in this case, during the initial melting of a hard alloy, its surface will change its shape due to the action of inertial forces, which will subsequently affect the thickness of the

deposited metal layer. Therefore, it is necessary to find theoretically this effect of rotary motion on the shape of the surface of the molten roller.

In the process of induction surfacing of the working surface of thin round disks, the disk is provided with rotational motion around the axis of symmetry with a certain angular velocity ω [4–6].

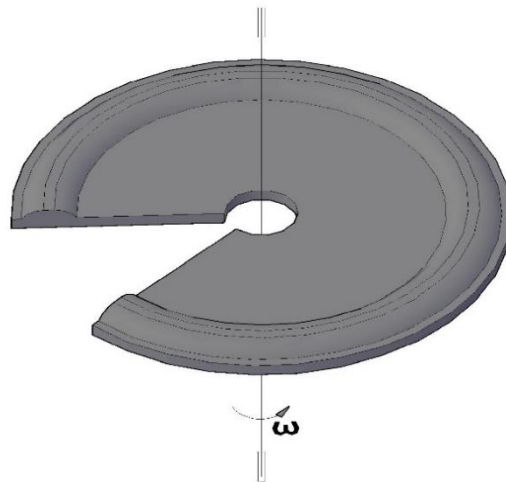


Figure 1. Fused disk using centrifugal rotation

The movement of the liquid is considered steady and it rotates like a solid body. The molten metal is in equilibrium with respect to the disc. Liquid equilibrium occurs under the condition that the net force of all forces acting on liquid points is equal to zero. The minimum potential energy corresponds to the equilibrium state. The total potential energy includes the gravitational component, the surface component, the energy of the interaction between the surface of the disk and the liquid, the energy of the interaction between the disk and the gas, as well as the potential energy of the elements of the liquid in the field of inertial forces.

For simplicity, let us consider the two-dimensional case in Fig. 2.

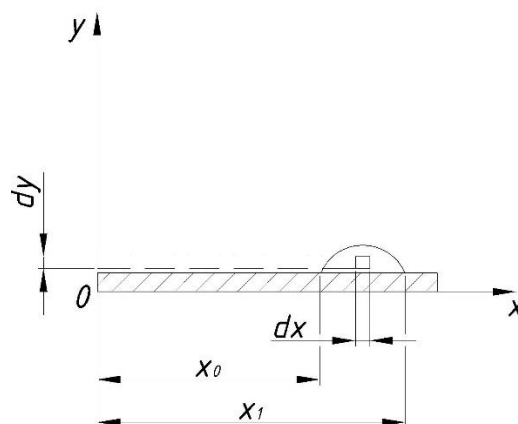


Figure 2. A drop of molten metal on the disk surface

In our case, the external forces are gravitational forces \vec{F}_g , which are directed vertically downward. A fluid element with area $dxdy$ and mass $dm = \rho_l dxdy$ (ρ_l – density per unit area of liquid) is acted upon by the force of weight $dF_g = gdm$ (g – acceleration of free fall). Potential energy of a fluid element in the field of gravitational forces:

$$dP_g = gydm = \rho_l gydxdy.$$

Then,

$$dF_{gy} = -\frac{\partial}{\partial y} dP_g = -\rho_l g dxdy = -gdm.$$

The total potential energy of the liquid, to the nearest arbitrary constant, is equal to:

$$P_g = \int_{x_0}^{x_1} \left(\int_0^{y(x)} \rho_l gydy \right) dx = \rho_l g \int_{x_0}^{x_1} \frac{y^2(x)}{2} dx. \quad (1)$$

The potential energy of surface tension is determined by the formula:

$$dP_{st} = \sigma_{lg} ds = \sigma_{lg} \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sigma_{lg} \sqrt{1 + y'^2} dx.$$

$$P_{st} = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{lg} \sqrt{1 + y'^2} dx, \quad (2)$$

if σ_{lg} the surface tension coefficient of the melt in contact with the gas phase.

The potential energy of the interaction between a solid body and a liquid, and a solid body and a gas is:

$$P_s = \int_{x_0}^{x_1} (\sigma_{sl} - \sigma_{sg}) dx = (\sigma_{sl} - \sigma_{sg}) \cdot (x_1 - x_0), \quad (3)$$

if σ_{sl} – the coefficient of surface tension of a solid in contact with a melt; σ_{sg} – the coefficient of surface tension of a solid in contact with the gas phase.

The inertial force acting on the element $dxdy$ is a centrifugal force acting in the radial direction (in the direction of the x -axis). The inertia force $dF_{in} = \omega^2 x dm$ acts on the $dxdy$ element with mass $dm = \rho_l dxdy$. This force can be expressed:

$$dF_{in} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{1}{2} \omega^2 x^2 dm \right),$$

thus, the potential energy of the liquid element in the field of inertial forces is:

$$dP_{in} = -\frac{1}{2} \omega^2 x^2 dm = -\frac{1}{2} \omega^2 x^2 \rho_l dxdy$$

and the total potential energy of the melt in the field of inertial forces is equal to:

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= \int_{x_0}^{x_1} \int_0^{y(x)} -\frac{1}{2} \omega^2 x^2 \rho_l dx dy = -\frac{1}{2} \rho_l \omega^2 \int_{x_0}^{x_1} \left(\int_0^{y(x)} x^2 dy \right) dx = \\
 &= -\frac{1}{2} \rho_l \omega^2 \int_{x_0}^{x_1} x^2 y(x) dx.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Therefore, for the total potential energy, we obtain:

$$P = \int_{x_0}^{x_1} \left[\frac{1}{2} \rho_l y (gy - \omega^2 x^2) + \sigma_{lg} \sqrt{1 + y'^2} + (\sigma_{sl} - \sigma_{sg}) \right] dx. \tag{5}$$

The task of finding the shape of the cross-section of the melt is reduced to determining the minimum of the obtained functional under the condition of constancy of the area of the cross-section of the melt. In this way, we obtained an isoperimetric variational problem for the conditional extremum. The condition for preserving the cross-sectional area of the melt is:

$$\int_{x_0}^{x_1} y dx = S, \tag{6}$$

if S – a given value. Then, an auxiliary function is deduced:

$$P_a = \int_{x_0}^{x_1} \left[\frac{1}{2} \rho_l y (gy - \omega^2 x^2) + \sigma_{lg} \sqrt{1 + y'^2} + (\sigma_{sl} - \sigma_{sg}) + \lambda y \right] dx,$$

if λ – the Lagrange multiplier. Since σ_{sl} and σ_{sg} are constant values at a fixed temperature, the minimum of the functional will be determined by the integral function:

$$F = \frac{1}{2} \rho_l y (gy - \omega^2 x^2) + \sigma_{lg} \sqrt{1 + y'^2} + \lambda y.$$

The minimum of the functional is known to be determined by the solution of the Euler equation:

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right),$$

which in our case will take the form:

$$\sigma_{lg} \frac{y''}{\sqrt{(1 + y'^2)^3}} = \rho_l \left(gy - \frac{\omega^2}{2} x^2 \right) + \lambda. \tag{7}$$

The shape of the cross section of the melt is determined by the solution of this equation, which must satisfy the boundary conditions:

$$y(x_0) = 0; y(x_1) = 0. \quad (8)$$

Parameters $x_0, x_1 \in (0, R)$, if R – the radius of the disk, are fixed values. The Lagrange multiplier λ is determined from the isoperimetric condition (6).

Let's enter the dimensionless coordinates:

$$\xi = \frac{x}{a}; \eta = \frac{y}{a}, \quad (9)$$

where a denotes the so-called capillary length:

$$a = \sqrt{\frac{\sigma_{lg}}{g(\rho_l - \rho_g)}}. \quad (10)$$

Then equation (7) in dimensionless coordinates will take the form:

$$\frac{\eta''}{\sqrt{(1 + \eta'^2)^3}} = \eta - \frac{a\omega^2}{2g}\xi^2 + \tilde{\lambda}. \quad (11)$$

The resulting second-order differential equation is written in the form of a normal system of two first-order differential equations:

$$\begin{cases} \eta'_0 = \eta_1 \\ \eta'_1 = (1 + \eta_1^2)^{\frac{3}{2}}(\eta_0 - \beta\xi^2 + \tilde{\lambda}). \end{cases} \quad (12)$$

The notation $\eta_0 = \eta$, $\eta_1 = \eta'$ is introduced here.

In this way, we obtained a two-point boundary value problem for the system of differential equations (12) with the boundary conditions specified at the ends of the interval:

$$\eta_0(\xi_0) = 0, \quad \eta_0(\xi_1) = 0. \quad (13)$$

The numerical solution of the problem was deduced using the Mathcad software environment. The algorithm for solving the problem is reduced to finding a solution relative to $\tilde{\lambda}$ of the transcendental equation:

$$\int_{\xi_0}^{\xi_1} \eta_0(\xi, \tilde{\lambda}) d\xi - \tilde{S} = 0, \quad (14)$$

which represents the isoperimetric condition (6) written in dimensionless coordinates.

The solution of equation (14) is deduced applying the usual dichotomy method. By setting λ , we find the solution of the boundary value problem (12), (13). Based on the solution, the left side of equation (14) is calculate. The boundary value problem is solved in two stages. First, applying the sbval program, we find the initial condition on the left edge for η_1 , and then, applying the Radau program, we solve the Cauchy problem for system (12). The Radau program is used because system (12) belongs to the so-called stiff systems.

Numerical calculations were performed for the data:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2, \rho_l = 7.8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3, \sigma_{lg} = 1.75 \text{ N/m}, \\ x_0 = 0.05 \text{ m}, x_1 = 0.07 \text{ m}, S = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2.$$

The results of the calculations are shown in Figs. 3 and Fig. 4.

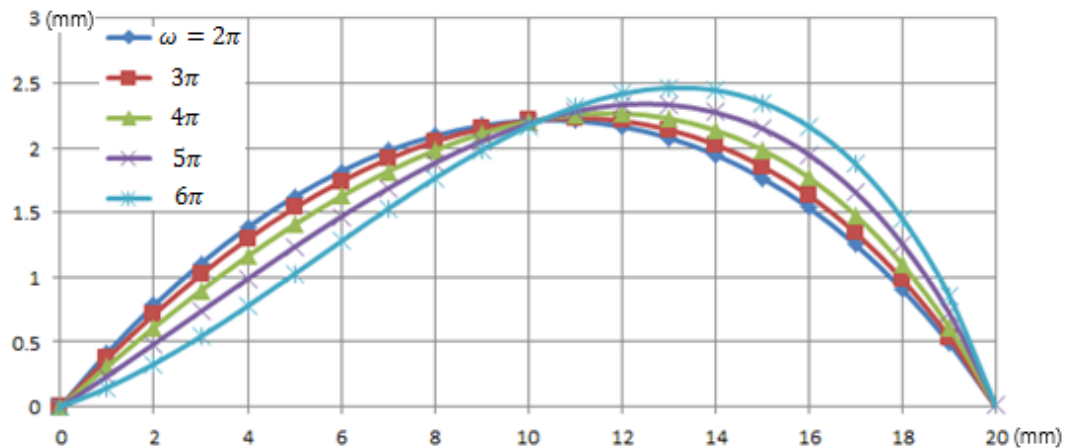


Figure 3. The shape of the fusion cross section ($y(x)$) to different values of the angular velocity

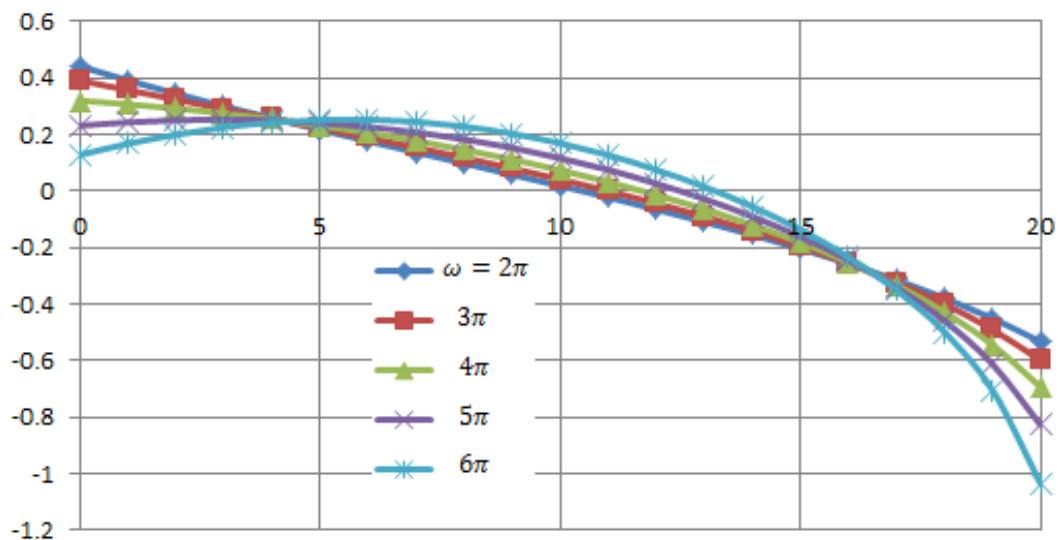


Figure 4. Dependence $y'(x)$ on different values ω

As we can see, with increasing angular velocity, the shape of the cross-section of the melt approaches the shape of a liquid drop located on the surface.

Conclusions. The above calculations make it possible to obtain a given geometric shape of the deposited roller depending on the angular velocity and its thickness, which ultimately increases the durability of the deposited surface, compared to the surfacing technology without disk rotation.

References

1. Pulka Ch. V. Tehnologichna ta energetychna efektyvnist' indukciynogo naplavlennya tonkyh stalevyh dyskiv: dis. ... doct. tehn. Nauk. Kyiv, 2006. [In Ukrainian].
2. Ryabcev I. A. Naplavka detalei mashyn i mekhanizmov. Kiev: Ecotehnologia, 2004. 160 p. [In Russian].
3. Pulka Ch. V., Shabliy O. N., Grabin V. F., Dzykovich I. Ya. Sovershenstvovanie tehnologii indukcyonnoy naplavki tonkih fasonnyh diskov. Avtomaticheskaya svarka. No. 1. 1991. P. 57–61. [In Russian].
4. Pulka Ch. V., Senchishin V. S., Havryliuk V. Ya., Bazar M. S. Vliyanie tehnologicheskikh shem indukcyonnoy naplavki na stabil'nost' tolshchiny naplavlennogo sloya. Avtomaticheskaya svarka. No. 4. 1991. P. 65–67. [In Russian].
5. Pulka Ch. V., Shabliy O. M., Havryliuk V. Ya., Senchyshyn V. S., Sharyk M. V. Sposib naplavlennya tonkyh dyskiv. Pat. na korysnu model' 77032 UA, MPK V23K 13/00. Zayavnyk i vlasnyk TNTU im. Ivana Puluja, 2012. [In Ukrainian].
6. Havryliuk V. Ya., Pulka Ch. V., Mykhailyshyn V. M. ta in. Matematychna model' ruhu krapli ridkogo metalu na poverhni obertovogo stalevogo dyska. Visnyk TNTU im. I. Puluja. No. 1 (97). 2020. P. 5–13. [In Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.01.005
7. Demchenko V. F., Fedorov O. P., Shuba I. V., Asnis Ju. A., Lisnyi A. B. Matematychni modeljuvannya hidrodinamichnyh ta teplovyh procesiv pry vyroschuvanni krystaliv iz rozplavu. Obschie voprosy metallurgii. No. 2. 2015. P. 42–50. [In Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2015.02.07>
8. Pachevych I.R., Riabov V.R., Deev G.F. Poverhostnye iavlenia pri svarke metallov, Kiev, Nauk. Dumka, 1991, 240 pp. [in Russian].

Список використаних джерел

1. Пулька Ч. В. Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків: дис. ... доктора техн. наук. Київ, 2006.
2. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов. К.: Екотехнологія, 2004. 160 с.
3. Пулька Ч. В., Шаблій О. Н., Грабин В. Ф., Дзыкович И. Я. Совершенствование технологии индукционной наплавки тонких фасонных дисков. Автоматическая сварка. 1991. № 1. С. 57–61.
4. Пулька Ч. В., Сенчишин В. С., Гаврилюк В. Я., Базар М. С. Влияние технологических схем индукционной наплавки на стабильность толщины наплавленного слоя. Автоматическая сварка. 2013. № 4. С. 65–67.
5. Пат. 77032 UA, МПК В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких дисків; заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. № u201201880; заявл. 20.02.2012; опубл. 10.09.2012; бюл. № 17.
6. Гаврилюк В. Я., Пулька Ч. В., Михайлишин В. М. та ін. Математична модель руху краплі рідкого металу на поверхні обертового сталевго диска. Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. 2020. № 1 (97). С. 5–13. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.01.005
7. Демченко В. Ф., Федоров О. П., Шуба І. В., Асніс Ю. А., Лісний А. Б. Математичне моделювання гідродинамічних та теплових процесів при вирощуванні кристалів із розплаву. Общие вопросы металлургии. 2015. № 2. С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2015.02.07>
8. Пачкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф. Поверхностные явления при сварке металлов. Киев: Наук. думка, 1991. 240 с.

УДК 621.793.927.7

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОБЕРТОВОГО РУХУ НА ФОРМУ ПОВЕРХНІ НАПЛАВЛЕНОГО ВАЛИКА

Михайло Михайлишин; Володимир Гаврилюк; Чеслав Пулька

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
Тернопіль, Україна*

Резюме. Деталі машин та механізмів у процесі роботи зазнають різноманітних навантажень, що пов'язано з їх передчасним спрацюванням. Важливою властивістю матеріалів є зносостійкість, яка власне й визначає ступінь протидії зношуванню контактуючих поверхонь у

процесі їх експлуатації різним видам спрацювання, серед яких основне місце посідає абразивне. Тому для підвищення експлуатаційного терміну деталей використовується їх зміцнення за допомогою різноманітних методів наплавлення, таких, як електродугового, вібродугового, газового, плазмового, індукційного та інших. У різних роботах розроблено технологію неперервно послідовного та одночасного індукційного наплавлення по всій робочій поверхні тонких дисків зубчастої та суцільної форми, з використанням мідного двовиткового кільцевого індуктора з круглим поперечним перерізом витків, що дозволяє рівномірно індукувати струми по перерізу деталі. При цьому в якості джерела живлення використовуються лампові генератори високої частоти. Розглянуто процес одночасного індукційного наплавлення тонких сталевих дисків порошкоподібними твердими сплавами, що володіють підвищеними властивостями зносостійкості. Наплавлення здійснюється в поєднанні з відцентровим обертанням при заданій кутовій швидкості, що є основною відмінністю порівняно з традиційною технологією, в якій деталь залишається нерухомою протягом усього наплавлявального циклу. Обертаний рух у процесі наплавлення здійснюється в момент плавлення зміцнювального матеріалу. Обертання диска дозволяє підвищити його термін експлуатації за рахунок зміцнення та збільшення в об'ємі розплавленого металу на його робочій поверхні. Наведені розрахунки дозволяють отримати задану геометричну форму наплавленого валика залежно від кутової швидкості та його товщини, що в кінцевому результаті підвищує довговічність роботи наплавленої поверхні порівняно з технологією наплавлення без обертання диска.

Ключові слова: розплавлений метал, сталевий диск, крапля, відцентрове обертання, кутова швидкість.

https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.117

Отримано 05.04.2022