

УДК 621.795

О.Й. Мажейка, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, E-mail: profkom551124@ukr.net***А.М. Лутай***Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна, E-mail: anat5@i.ua*

Чисельне моделювання при дослідженні процесів ультразвукової обробки сталевих деталей сільськогосподарської техніки

Сформульовано модельна контактна задача для дослідження процесів поверхневого зміцнення пластичним деформуванням з застосуванням ультразвукового впливу. Проведено чисельне моделювання та намічені шляхи оптимізації параметрів розглянутого технологічного процесу. Вирішена крайова задача рівняння руху, співвідношенню Коші, фізичні співвідношення складових компонент деформації при необхідних граничних умовах. Встановлено зв'язок радіуса індентора з його навантаженням для досягнення якісних показників процесу ультразвукового впливу. Доказано, що ультразвукова обробка деталей сільськогосподарської техніки дозволяє збільшувати мікротвердість сталевих поверхонь до 27 %.

чисельне моделювання, деталь, вплив, циліндр, теорія, ультразвук, деформація, тензор напружень, опір втоми, сталь, індентор, мікротвердість

А.И. Мажейка, проф., канд. техн. наук*Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина***А.М. Лутай***Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина*

Численное моделирование при исследовании процессов ультразвуковой обработки стальных деталей сельскохозяйственной техники

Сформулирована модельная контактная задача для исследования процессов поверхностного упрочнения пластическим деформированием с применением ультразвукового воздействия. Проведено численное моделирование и намечены пути оптимизации параметров рассматриваемого технологического процесса. Решена крайовая задача уравнения движения, соотношению Коши, физические соотношения составляющих компонент деформации при необходимых граничных условиях. Установлена связь радиуса индентора с его нагрузкой для достижения качественных показателей процесса ультразвукового влияния. Доказано, что ультразвуковая обработка деталей сельскохозяйственной техники позволяет увеличивать микротвердость стальных поверхностей до 27%.

численное моделирование, деталь, влияние, цилиндр, теория, ультразвук, деформация, тензор напряжений, сопротивление усталости, сталь, индентор, микротвердость

Постановка проблеми. Підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів є пріоритетом подальшого розвитку сучасних технологій. Одним з них є технологічна обробка поверхні деталі за допомогою ультразвуку. Застосування ультразвуку дозволяє істотно підвищити якість оброблюваної поверхні і за рахунок поверхневого зміцнення матеріалу забезпечити високу зносостійкість деталей. У зв'язку з цим оптимізація технологічних параметрів механічної обробки матеріалів з використанням ультразвукового впливу і підвищення ефективності обробки вельми актуальним видається дослідження напружено-деформованого стану в деталях і вузлах сільськогосподарських машин при комбінованому ультразвуковому впливі [1-3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах, присвячених вивченню характеристик сталевих сталей після ультразвукової обробки, показана можливість підвищення їх мікротвердості [2-5]. Механічні процеси, що відбуваються при взаємодії робочого інструмента і поверхні деталі складні. Тому спочатку доцільно вивчити

специфічні аспекти поведінки оброблюваного матеріалу на базі чисельного моделювання.

Постановка завдання. Метою даної роботи було дослідження характеристики сталевих деталей сільськогосподарської техніки після ультразвукового впливу, що забезпечує підвищення їх ресурсу.

Виклад основного матеріалу. З цією метою оброблювану деталь представимо у вигляді кругового металевго циліндра висоти і радіусу, до центру однієї з торцевих поверхонь якого прикладається робочий інструмент у вигляді абсолютно твердого индентора в формі півсфери. Силовий вплив робочого органу на матеріал моделюється шляхом додатка до индентора спрямованого уздовж загальної осі симетрії индентора і циліндра зусилля

$$F(t) = F_0 + F_I \sin \omega t, \quad (1)$$

де F_0 і F_I - відповідно постійна і змінна складові зусилля.

Віднесемо циліндр до декартовій системі координат, розташувавши її початок в центрі оброблюваної поверхні і направивши одну з осей вздовж загальної осі симетрії индентора і циліндра (рис. 1).

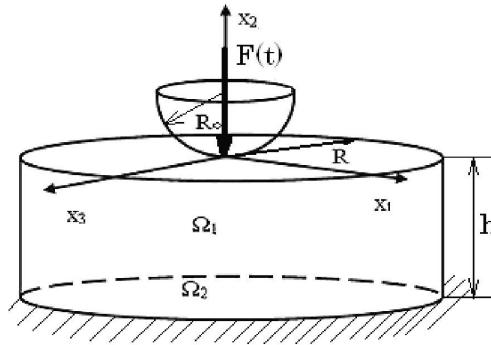


Рисунок 1 – Схема процесу ультразвукового зміцнення циліндра

Будемо вважати, що нижня торцева поверхня циліндра жорстко закріплена, а бічна і верхня торцева, крім зони контакту, вільні від зовнішнього навантаження. З урахуванням прийнятих припущень, за умови, що матеріал циліндра є пружнопластичним з ізотропно-кінематическим зміцненням і деформації є малими, дослідження напружено-деформованого стану в рамках теорії течії в класичній постановці [1] зводиться до вирішення наступного крайової задачі:

1-рівняння руху

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} \quad (i = \overline{1,3}); \quad (2)$$

2-співвідношення Коші

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = \overline{1,3}); \quad (3)$$

3-фізичні співвідношення

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{el} + \varepsilon_{ij}^{pl} \quad (i, j = \overline{1,3}); \quad (4)$$

а) для пружних складових компонент деформації

$$\varepsilon_{ij}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma_{nd} \right) \quad (i, j = \overline{1,3}); \quad (5)$$

б) для пластичних складових компонент деформації

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} = \dot{\varepsilon}^{pl} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (i, j = \overline{1,3}); \quad (6)$$

4-граничні умови:

$$\begin{aligned} u_2 &= 0 \quad \text{при} \quad (x_1, x_2, x_3) \in \Omega_2, \\ \sigma_n &= \tau_{ns} = 0 \quad \text{при} \quad (x_1, x_2, x_3) \in \Omega_1, \\ \sigma_{22}|_{x_2=0} &= 0 \quad \text{при} \quad (x_1, x_3) \in \Omega_3, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{12}|_{x_2=0} &= \sigma_{23}|_{x_2=0} = 0 \quad \text{при} \quad (x_1, x_3) \in \Omega_3 \cup \Omega_4, \\ \sigma_{22}|_{x_2=0} &= -p(x_1, x_2, t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} v_n^1 - v_n^2 \leq 0, t_n^c \leq 0, (v_n^1 - v_n^2)t_n^c &= 0 \quad \text{при} \quad (x_1, x_3) \in \Omega_4, \\ \iint_{\Omega_4} p(x_1, x_3, t) dx_1 dx_3 &= F(t). \end{aligned} \quad (9)$$

У формулах (2) - (9) прийняті наступні позначення: σ_{ij} – компоненти тензора напружень; σ ; ε_{ij} – компоненти тензора деформацій; ε_{ij}^{el} – пружні компоненти деформацій; ε_{ij}^{pl} – пластичні компоненти деформацій; u_i – компоненти зсуву; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – щільність матеріалу; σ_n – нормальна напруга; τ_{ns} – дотичне напруження; t_n^c – напруга взаємодії тел в напрямку нормалі n -до контактної поверхні; v_n^1 – нормальна компонента швидкості точок индентора на поверхні контакту; v_n^2 – нормальна компонента швидкості точок циліндра на поверхні контакту.

Середня напруга і інтенсивність швидкостей пластичних деформацій в (5) і (6) відповідно визначаються співвідношеннями

$$\sigma_{n\bar{o}} = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (i = \overline{1,3}) \quad \dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij}^{pl} \cdot \varepsilon_{ij}^{pl}} \quad (i, j = \overline{1,3}) \quad (10)$$

Слідуючи [4], модель ізотропно-кінематичного зміцнення прийнята у вигляді:

$$F = f(\sigma, \alpha) - \sigma^0 = 0, \quad (11)$$

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\dot{\varepsilon}^{pl}}), \quad (12)$$

$$f(\sigma, \alpha) = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (S_{ij} - \alpha_{ij}^{dev})(S_{ij} - \alpha_{ij}^{dev})}, \quad (13)$$

$$\alpha_{ij} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha_{ij} \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (i, j = \overline{1,3}), \quad (14)$$

де $\sigma|_0$ і σ^0 – значення межі текучості в момент появи пластичної деформації і в поточний момент часу; S – девіатор тензора напружень; α – тензор мікронапруг, α^{dev} – девіатор тензора мікронапруг; Q_∞, b, C, γ – параметри, що визначаються за допомогою експериментальних даних.

Аналітичне рішення поставленого завдання пов'язане з непереборними математичними труднощами. Тому, слідуючи [2], її рішення зведемо до виконання наступного варіаційного нерівності (в позначеннях зазначеної роботи):

$$\int_{\Omega} (\delta v_{i,j} \sigma_{ji} + \delta v_i \rho \dot{v}_i) d\Omega - \int_{\Gamma_t} (\delta v_i \bar{t}_i) d\Gamma + \int_{\Gamma^c} \delta [\lambda (v_n^1 - v_n^2)] d\Gamma \geq 0, \quad (15)$$

де δv_i – пробні функції; \bar{t}_i – поверхневі зусилля; λ – множник Лагранжа.

Уявімо швидкості і множник Лагранжа у вигляді:

$$\begin{aligned} v_i(x_j, t) &= \sum_{I \in \Omega} N_I(x_j) v_{Ii}(t) \quad (i, j = \overline{1,3}); \\ \lambda(\zeta, t) &= \sum_{I \in \Gamma^c} \Lambda_I(\zeta) \lambda_I(t), \end{aligned} \quad (16)$$

де $N_I(x_j)$, $\Lambda_I(\zeta)$ – функції форми [2].

Після підстановки цих виразів в нерівність і проведення необхідних перетворень [2], отримаємо:

$$\begin{aligned} M\ddot{d} + f^{\text{int}} - f^{\text{ext}} + G^T \lambda &= 0; \\ Gv &\leq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Тут f^{int} і f^{ext} – внутрішні і зовнішні зусилля відповідно, а компоненти матриць M і G

$$\begin{aligned} M_{ijIJ} &= \delta_{ij} \int_{\Omega} \rho N_I N_J d\Omega; \\ G_{JjI} &= \int_{\Gamma^c} \Lambda_I N_J n_j d\Gamma. \end{aligned} \quad (18)$$

Рішення системи (17) здійснюється методом кінцевих елементів із застосуванням програмного комплексу ABAQUS [4].

Результати досліджень. В якості непрямих характеристик, що дозволяють судити про рівень зміцнення матеріалу, були прийняті залишкові пластичні деформації в напрямку загальної осі симетрії циліндра і індентора і щільність матеріалу, що є функцією інтенсивності залишкових деформацій. Тому з огляду на обмеженість обсягу в даній роботі наводяться результати чисельного аналізу тільки цих характеристик. Всі розрахунки проводилися для циліндра радіуса $R = 0,016$ м, висоти $h = 0,01$ м і індентора радіуса $R_0 = 0,006$ м при наступних значеннях параметрів [3]:

$$\begin{aligned} \rho &= 7800 \text{ кг/м}^3, \quad E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad \nu = 0,3, \quad \sigma_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad Q_{\infty} = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}, \\ b &= 0,26, \quad C = 2,55 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \quad \gamma = 81, \quad \text{и} \quad \omega = 150000. \end{aligned}$$

На рис. 2 показані графіки поведінки зазначених характеристик при різних умовах навантаження індентора.

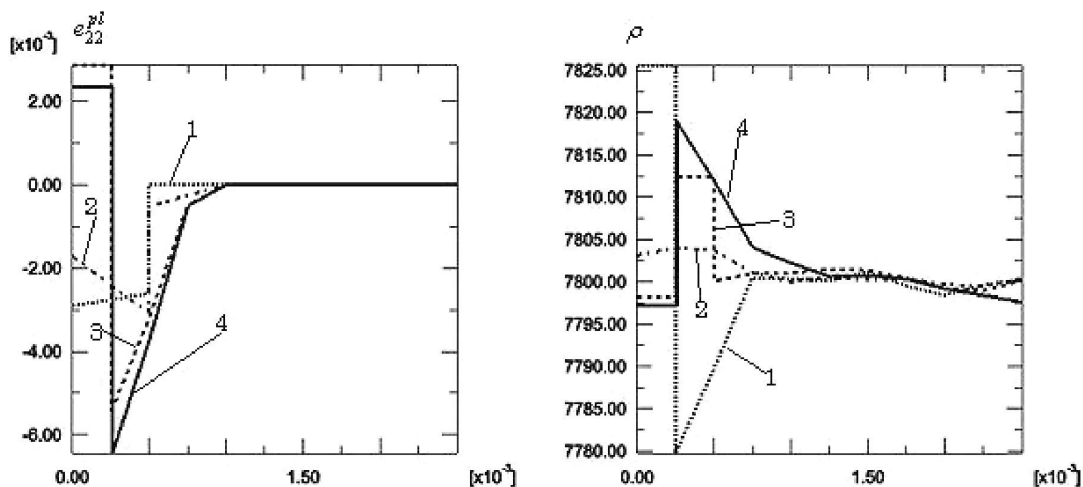
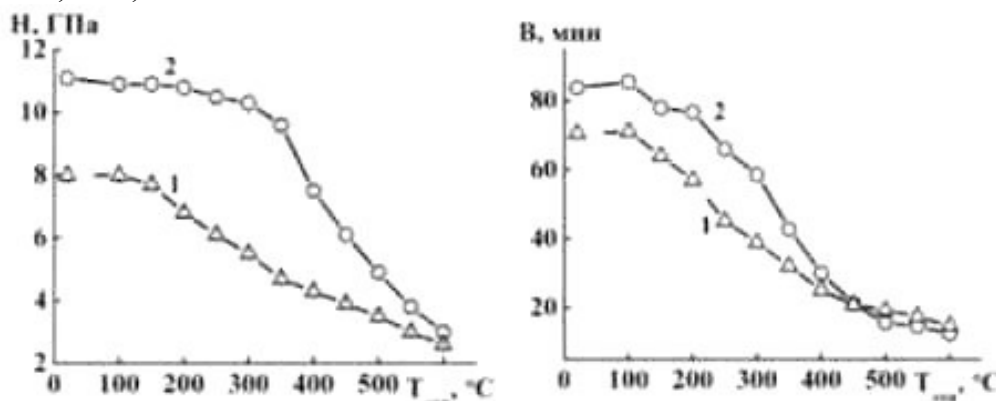


Рисунок 2 – Розподіл осьових залишкових пластичних деформацій і щільності по глибині

На графіках прийнято такі позначення, що відповідають параметрам навантаження: 1 - = 166,77 Н, = 0; 2 - = 166,77 Н, = 9,81 Н; 3 - = 166,77 Н, = 19,62 Н; 4 - = 166,77 Н, = 29,43 Н.



Риунок 3 – Вплив температури відпустки на мікротвердість H (а) і інтегральну ширину B рентгенівської лінії (110) α (б) сталі 45 в вихідному загартованому стані (крива 1) і після ультразвукової обробки (крива 2).

Висновки. Додаток ультразвукових коливань до індентора істотно впливає на якісний і кількісний характер поведінки залишкових осьових пластичних деформацій і щільності. Також істотно (до 27%) підвищується мікротвердість, що має важливе значення при зміцненні сталевих деталей сільськогосподарської техніки. Тому, варіюючи параметри силового і ультразвукового навантажень, можна управляти процесом формування зміцненого шару в матеріалі.

Список літератури

1. Галин А.Н. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости [Текст] / А.Н. Галин. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
2. Belytschko T. Nonlinear finite elements for continua and structures [Text] / T. Belytschko, W.K. Liu, B. Moran. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000. – 666 p.
3. Doghri I. Fully Implicit Integration and Consistent Tangent Modulus in Elasto-Plasticity [Text] / I. Doghri // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1993. – Vol. 36. – P. 3915-3932.
4. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.4. Hibbit: Karlsson & Sorensen, Inc. USA. – 2002.
5. Мажейка О.Й. Зміцнення деталей сільськогосподарських машин сучасними методами деформуванням [Текст] / О.Й. Мажейка, О.Б. Чайковський, А.Н. Лутай // Збірник наук.праць Кіровоградського націон.техн.університету. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2010, Вип. 40, ч. 1. – С. 253-256.

Referencis

1. Galin, A.N. (1980). *Kontaktnye zadachi teorii uprugosti i vjzkouprugosti [Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity]*. Moscow: Nauka.
2. Belytschko, T., Liu, W.K. & Moran, B. (2000). *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
3. Doghri, I. (1993). Fully Implicit Integration and Consistent Tangent Modulus in Elasto-Plasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 36*, 3915-3932.
4. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.4. (2002). Hibbit: Karlsson & Sorensen, Inc. USA.
5. Mazhejka, O.J., Chajkovs'kyj, O.B. & Lutaj, A.N. (2010). Zmitsnennia detalej sil'skohospodars'kykh mashyn suchasnymy metodamy deformuvanniam [Hardening of details agricultural machines modern technologies] *Zahaljnoderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'sjkoghospodarsjkykh mashyn – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines, Vol. 40, 1*, 253-256.

Oleksandr Mazheyka, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian national technical university, Kropyvnickiy, Ukraine

Anatoliy Lutai

National technical university of Ukraine «KPI», Kyiv, Ukraine

Numerical Modeling in the Study of Ultrasonic Processing of Steel Parts of Agricultural Machinery

The priority is given to carrying out studies to improve the performance characteristics of agricultural machinery parts in the context of modern technologies. The value of ultrasonic effects for the surface treatment of steel parts is established. The relevance of research is determined. The analysis of literature sources is carried out, the necessity of optimization of technological parameters of mechanical processing of materials with use of ultrasonic influence is shown. It is established that, mechanical processes that occur during the interaction of an ultrasonic working tool and the surface of a part are rather complicated.

The expediency of studying specific aspects of the behavior of the machined material of parts on the basis of numerical modeling is determined. A model contact problem was formulated to study the processes of surface hardening during plastic deformation using ultrasound. The research tasks, boundary conditions are determined. Numerical simulation is carried out and ways of optimization of parameters of the considered technological process are described. The boundary value problem of the equation of motion, the Cauchy relation, the physical relationships of the components of the deformation components with the necessary boundary conditions are solved. As indirect characteristics, allowing to judge the level of strengthening of the material, residual plastic deformations were taken in the direction of the general axis of symmetry of the cylinder and the indenter.

The relationship between the radius of the indenter and its load is established to achieve qualitative indices of the process of ultrasonic action. The state of the surface of steel parts by parameters of microhardness and structural components is studied.

It is proved that ultrasonic treatment of agricultural machinery parts allows to increase microhardness of steel surfaces up to 27%. It is established that by changing the parameters of power and ultrasonic load, it is possible to control the formation of a hardened layer in the material.

numerical modeling, detail, influence, cylinder, theory, ultrasound, deformation, stress tensor, fatigue resistance, steel, indenter, microhardness

Одержано (Received) 05.06.2018

УДК 621.9.048.4

В.І. Носуленко, проф., д-р техн. наук, В.М. Шмельов, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, E-mail: shmelyovvm@gmail.com

Якісні характеристики джерел тепла на сталевих електродах

Описано згідно існуючих уявлень в області фізики теплових процесів деякі якісні характеристики джерел тепла на електродах в умовах РОД та їх відповідність експериментальним даним для електродів із заліза та сталей. Можливості та якісні і кількісні характеристики процесу РОД визначаються якісними характеристиками (якістю) джерел тепла на електродах, перш за все, об'ємною густиною теплової потужності, яка, визначається динамічним тиском потоку робочої рідини та полярністю електродів. В зв'язку з цим є можливим легко керувати якістю джерел тепла на електродах, а отже і якістю процесу ерозії, здійснюючи обробку незалежно від струму в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і аж до превалюючого тонкого розмірного випаровування.

електрична дуга, анод, катод, стовп дуги, джерело тепла, робоча рідина, густина струму

© В.І. Носуленко, В.М. Шмельов, 2018