

SYMULACJA NUMERYCZNA ZJAWISK FIZYCZNYCH PODCZAS NAGNIATANIA TOCZNEGO W PROCESIE REGENERACJI CZĘŚCI MASZYN ROLNICZYCH

Katarzyna Szczepanik, Leon Kukielka, Radosław Patyk

Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Koszalińska

Krzysztof Kukielka

Katedra Inżynierii Produkcji, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. Praca dotyczy komputerowej analizy zjawisk fizycznych zachodzących w warstwie wierzchniej części maszyn rolniczych podczas nagniatania jako końcowej operacji procesu regeneracji. Do analizy przyrostu pól temperatur użyto podprogram TEMPERATURA programu SYMUL-NAGN. Analizę stanu odkształceń i naprężeń dokonano w systemie ANSYS/LS-DYNA. Opracowane aplikacje pozwalają określić właściwości warstwy wierzchniej dla danych warunków realizacji procesu lub odwrotnie, mogą określać wartości parametrów technologicznych dla pożądanego właściwości WW. Jest to niezbędne do prawidłowego projektowania procesu technologicznego regeneracji części. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznych.

Słowa kluczowe: nagniatanie, symulacja, ANSYS, SYMUL-NAGN, zjawiska fizyczne, warstwa wierzchnia

Wprowadzenie

Regeneracja części maszyn rolniczych ma znaczący wpływ na obniżkę kosztów produkcji rolniczej. Jest to proces technologiczny, w którym przywraca się pierwotne cechy konstrukcyjne i jakościowe zużytych lub uszkodzonych częściom [Tomczyk 2010].

W Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Koszalińskiej opracowano metodę regeneracji części maszyn rolniczych, pracujących w trudnych warunkach. Proces ten składa się z następujących operacji: szlifowanie (lub toczenie) powierzchni zewnętrznej części zużytej, napawanie, szlifowanie (lub toczenie) powierzchni napawanej, końcowe kształtowanie wymiarów i warstwy wierzchniej w operacji nagniatania tocznego.

Zastosowanie obróbki powierzchniowej nagniataniem jako wykończającej operacji procesu regeneracji części maszyn rolniczych, pozwala na stosunkowo łatwe i niezbyt kosztowne poprawienie właściwości użytkowych. Obróbka ta realizowana jest głównie ze względu na umocnienie materiału na głębokości warstwy wierzchniej i poprawę gładkości obrabianej powierzchni [Przybylski 2008].

Największe możliwości kształtowania właściwości warstwy wierzchniej posiada nagniatanie z elektrokontaktowym nagrzewaniem, gdyż oprócz oddziaływań mechanicznych

występuje tu oddziaływanie cieplne [Kukielka 1994]. Jednakże zastosowanie tego sposobu w przemyśle krajowym jest niedostateczne gdyż są trudności w projektowaniu procesu technologicznego. Istniejące modele statystyczno-doświadczalne procesu nagniatania uwzględniają związki pomiędzy określonymi właściwościami WW, a parametrami technologicznymi nagniatania, a pomijają często m. in. zjawiska fizyczne towarzyszące procesowi. Ponadto wzory te obowiązują jedynie dla identycznych jak podczas badań warunków obróbki.

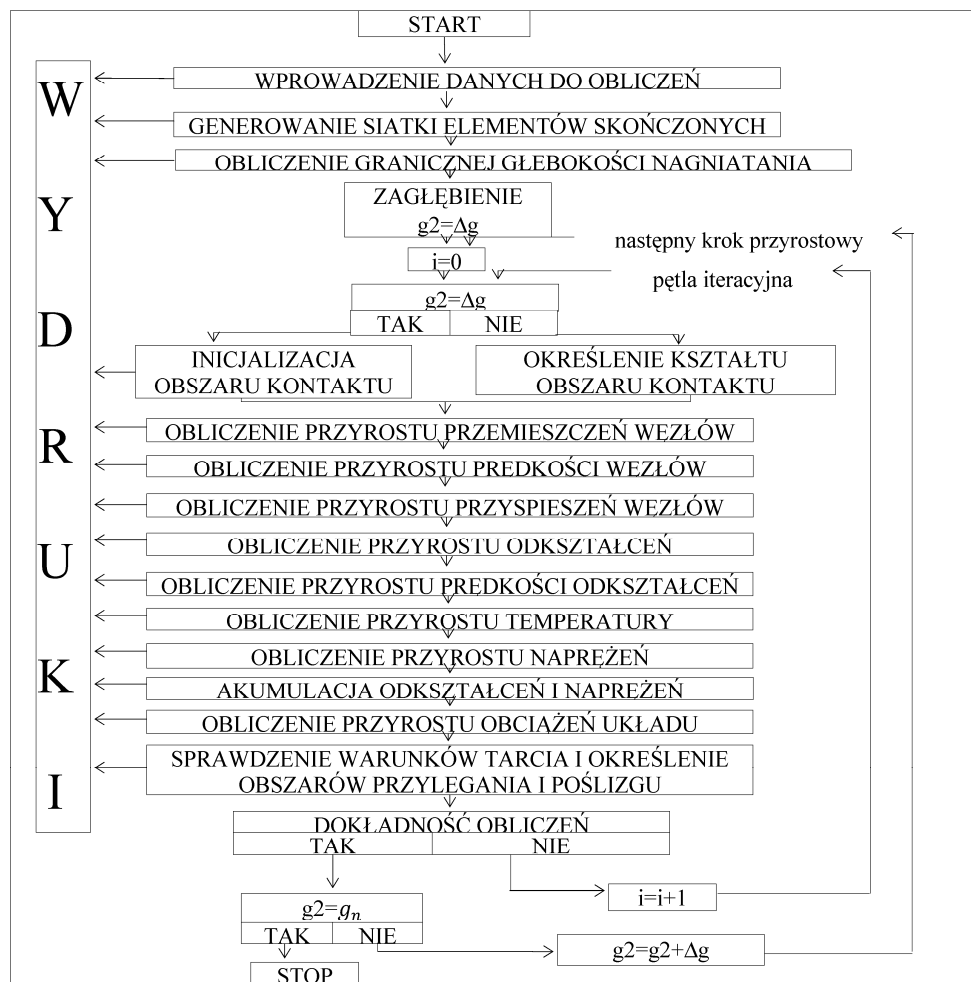
Cel pracy

Celem pracy jest analiza zjawisk fizycznych tj. pól temperatur oraz stanów naprężeń i odkształceń występujących w warstwie wierzchniej części regenerowanych podczas procesu nagniatania.

Analiza przyrostu pól temperatur

Dużym ułatwieniem w projektowaniu końcowej operacji procesu regeneracji części maszyn rolniczych jest opracowany pakiet programów komputerowych SYMUL-NAGN, który umożliwia przeprowadzenie kompleksowej analizy procesu nagniatania. Analiza przyrostu pól temperatur została dokonana za pomocą podprogramu komputerowego TEMPERATURA w programie SYMUL-NAGN. Algorytm przyrostowej analizy operacji nagniatania ze sztywnym dociskiem narzędzi przedstawia rys. 1.

Rozważono przypadek nagniatania tocznego z prądem części typu wałek o średnicy $\phi 30$, wykonany ze stali 55 normalizowanej. Powierzchnia wałka po obróbce poprzedzającej posiada zdeterminowany, okresowy profil chropowatości, o trójkątnym zarysie nierówności i następujących parametrach: wysokość $R_{zt} = 0,142$ mm, średni kąt pochylenia boków $\alpha_1 = \alpha_2 = 55^\circ$, średni promień krzywizny wgłębienia $r_w = 0$ i średni odstęp $S = 0,5$ mm. Nagniatanie realizowane jest w jednym przejściu, krążkiem dwutoroidalno-walcowym o wymiarach: $D_0 = 60$ mm, $r_g = 0,3$ mm i $b = 1,2$ mm, wykonanym z węgla S20. Posuw $p_n = 0,5$ mm \cdot obr $^{-1}$, głębokość nagniatania $g = 0,071$ mm, prędkość nagniatania $v_n = 0,95$ i $1,5$ m \cdot s $^{-1}$, natężenie prądu elektrycznego $I = 0, 100, 300, 500$ i 700 A. Ponadto do obliczeń przyjęto następujące dane: ciepło właściwe $C = 484 + 0,01\Delta T$ [J \cdot kg $^{-1} \cdot$ K $^{-1}$], współczynnik wnikania ciepła $\alpha_c = 535$ [W \cdot m $^{-2} \cdot$ K $^{-1}$], współczynnik radiacyjny $\alpha_R = 0,363(T - T_0) - 1[(0,01T)^4 + (0,01T_0)^4]$ [W \cdot m $^{-2} \cdot$ K $^{-1}$], współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha = \alpha = (16 + 0,01\Delta T)10^{-6}$ [K $^{-1}$], rezystywności $\rho_{1p} = 15(1 + 0,00196\Delta T)10^{-8}$ [$\Omega \cdot$ m], $\rho_{1n} = 57,6(1 + 0,00282\Delta T)10^{-8}$ [$\Omega \cdot$ m], współczynnik tarcia $\mu = \mu_0(1 - 0,003v_r)(1 - 0,000015\Delta T)$ (gdzie: μ_0 uwzględnia wpływ struktury geometrycznej powierzchni, v_r jest prędkością wzajemnego poślizgu), gęstość $\rho = 7850/(1 + 3\alpha\Delta T)$ [kg \cdot m $^{-3}$], przewodność cieplną $\lambda_p = 42 - 0,012\Delta T$ [W \cdot m $^{-1} \cdot$ K $^{-1}$], $\lambda_n = 13,2207 - 0,0032\Delta T$ [W \cdot m $^{-1} \cdot$ K $^{-1}$].

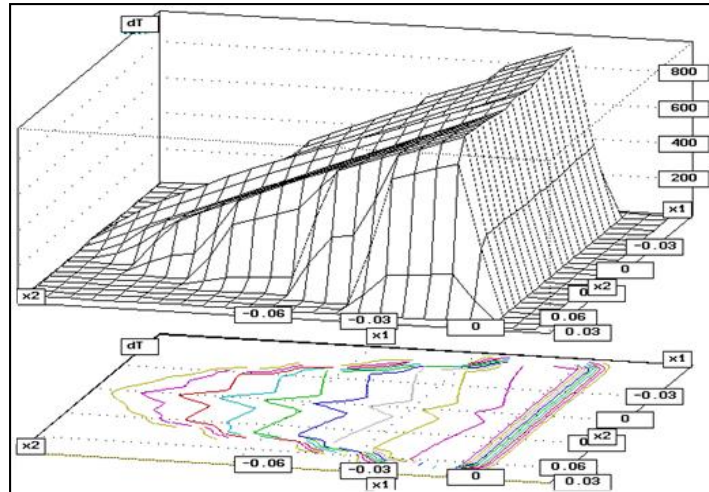


Źródło: opracowanie własne

Rys. 1. Schemat przepływu pakietu programów SYMUL-NAGN podczas analizy procesu nagniatania tocznego

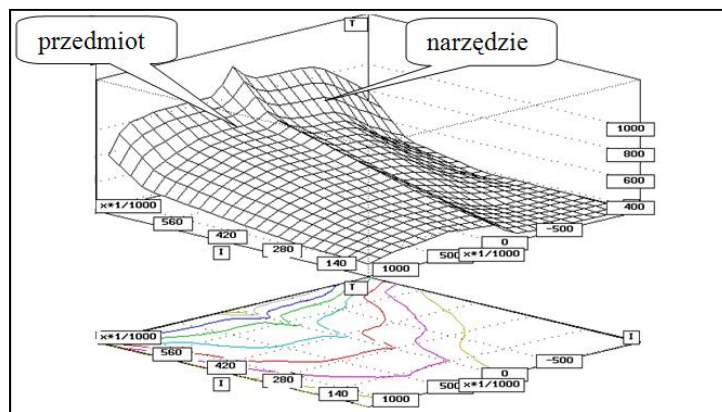
Fig. 1. Flow chart of software package SYMUL-NAGN during analysis of the burnishing rolling process

Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2–4.



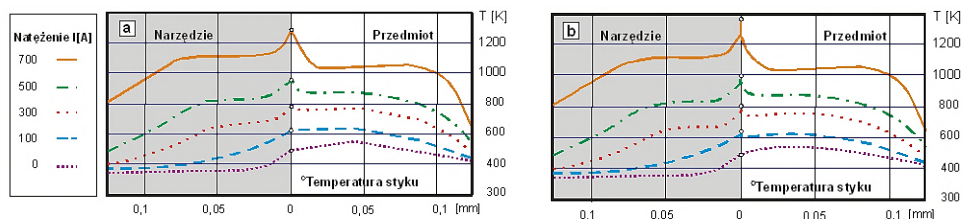
Źródło: opracowanie własne

Rys. 2. Pole przyrostu temperatury wypadkowej ΔT na powierzchni kontaktu narzędzia z przedmiotem, dla $I = 450$ [A], $v_n = 0,95$ [$m \cdot s^{-1}$] i $\mu_0 = 0,02$
 Fig. 2. The field of resultant temperature increment ΔT on surface in contact with the tool, for $I = 450$ [A], $v_n = 0,95$ [$m \cdot s^{-1}$] i $\mu_0 = 0,02$



Źródło: opracowanie własne

Rys. 3. Rozkład temperatury wypadkowej T w głąb warstwy wierzchniej przedmiotu i narzędzia na osi x_3 ($x_1 = x_2 = 0$), w zależności od natężenia prądu elektrycznego, dla $v_n = 1,5$ [$m \cdot s^{-1}$], $\mu_0 = 0,02$ (styk idealny $R_s = 0$)
 Fig. 3. Distribution of the resultant temperature T into the surface layer of the object and the tool on axis x_3 ($x_1 = x_2 = 0$), depending on the intensity of the electric current for $v_n = 1,5$ [$m \cdot s^{-1}$], $\mu_0 = 0,02$ (perfect contact $R_s = 0$)



Źródło: opracowanie własne

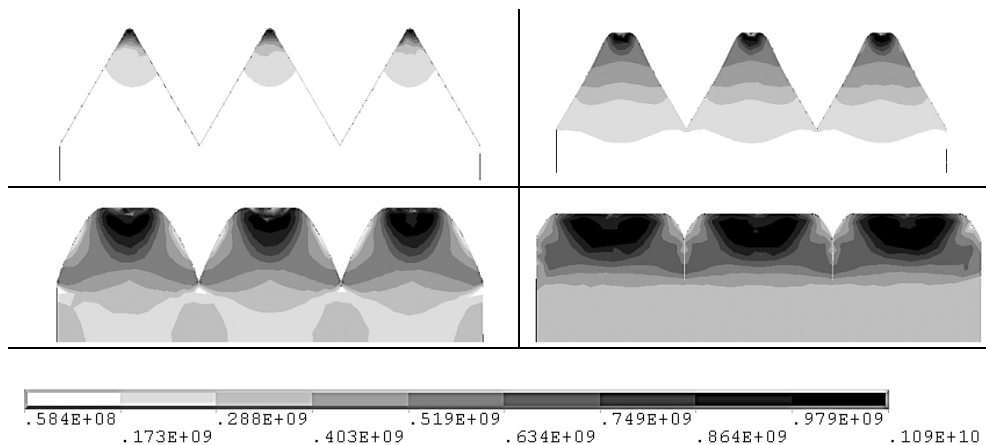
Rys. 4. Rozkład temperatury w narzędziu i przedmiocie w przekroju osiowym dla styku idealnego ($R_s = 0$) (a) i z oporem cieplnym ($R_s = 0,094 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$, warunek IV na styku narzędzie-przedmiot) (b)

Fig. 4. Temperature distribution in the tool and the object in the axial section for the perfect contact ($R_s = 0$) (a) and with thermal resistance ($R_s = 0,094 \text{ [m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$, the condition (IV) at the contact tool-subject) (b)

Analiza numeryczna w programie Ansys stanów naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej części regenerowanej

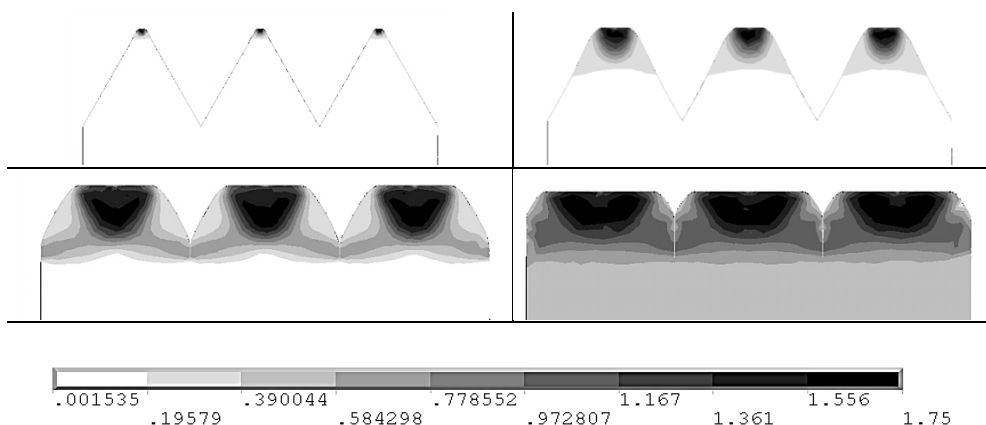
W warstwie wierzchniej kształtowanej nagniataniem występują naprężenia własne, które wpływają na właściwości eksploatacyjne części. Podstawowym problemem jest określenie warunków realizacji procesu, które zapewnią otrzymanie pożądanego rozkładu naprężeń w warstwie wierzchniej lub odwrotnie określenie rozkładu naprężeń dla zadanych warunków realizacji procesu [Przybylski 1987]. Możliwe jest rozwiązanie przybliżone z założoną dokładnością, na drodze numerycznej. W tym celu wykorzystano metodę elementów skończonych. Opracowano aplikację w systemie Ansys pozwalającą na analizę zjawisk zachodzących w procesie zgniatania nierówności płaskim stemplem. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 5 i 6.

Geometrię przedmiotu zamodelowano w układzie płaskim (2D). Narzędzie traktowano jako ciało idealnie sztywne ($E \rightarrow \infty$), natomiast materiał obrabiany (stal 55) jako ciało sprężysto/lepko-plastyczne. Do dyskretyzacji użyto elementu skończonego typu SOLID 183. Zostały odebrane translacyjne i rotacyjne stopnie swobody na krawędziach modelu nagniatanego, natomiast dla stempla zadano przemieszczenie po osi OY.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5. Mapy intensywności naprężeń podczas nagniatania nierówności
Fig. 5. The maps of stress intensity during burnishing of inequality



Źródło: opracowanie własne

Rys. 6. Mapy intensywności odkształceń podczas nagniatania nierówności
Fig. 6. The maps of strain intensity during burnishing of inequality

Wnioski

Proces regeneracji części maszyn rolniczych, w którym stosuje się nagniatanie toczne, jako operację wykończeniową jest geometrycznie, fizycznie i cieplnie nieliniowym pro-

blemem brzegowo-początkowym, z nieliniowymi warunkami brzegowymi. Dodatkowym utrudnieniem modelowania, analizy i symulacji takich problemów jest tylko częściowa znajomość warunków brzegowych, które nie są znane w obszarze styku ciał. Uwikłana i nieliniowa postać związków fizycznych określających podstawowe wielkości charakteryzujące mechanikę ciała odkształcalnego (rozkłady odkształceń, prędkości odkształceń i naprężeń, obszary odkształceń sprężystych i lepko-plastycznych, wyężenie materiału, obszary zniszczenia, itp.) oraz mechanikę powierzchni (obszary styku naciski, siły tarcia, topografia powierzchni) powodują, że niemożliwe jest ścisłe rozwiązanie otrzymanych układów równań różniczkowych wraz z odpowiednimi warunkami początkowymi i brzegowymi. Możliwe jest natomiast rozwiązanie przybliżone, z założoną z góry dokładnością.

Zastosowanie programu SYMUL-NAGN oraz programu ANSYS pozwala na analizę zjawisk fizycznych występujących w procesie nagniatania części maszyn rolniczych.

Dzięki tym programom komputerowym możliwe jest badanie pól przyrostu temperatury oraz stanów naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej wyrobu. Przy pomocy programów można określać właściwości warstwy wierzchniej dla danych warunków realizacji procesu lub odwrotnie, określać wartości parametrów technologicznych dla pożądaných właściwości WW.

Symulacja numeryczna procesu nagniatania pozwala ograniczyć zużycie materiałów, a poza tym ułatwia i skraca czas potrzebny do przeprowadzenia operacji nagniatania (optymalizacja procesu), co może przynieść znaczne oszczędności.

Bibliografia

- Hebda M. Wachal A.** 1980. Trybologia. WNT. s. 73-85.
- Kleiber M.** 1989. Wprowadzenie do metody elementów skończonych. PWN. Warszawa Poznań. ISBN 8301076984.
- Przybylski W.** 1987. Technologia obróbki nagniataniem. WNT. Warszawa. ISBN 8320407427
- Przybylski W.** 2008. Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Gdańsk. s. 229-239.
- Kukielka L.** 1995. Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Monografia Wydziału Mechanicznego Nr 47. Koszalin. ISBN 8390051087.
- Tomczyk W.** 2010. Ekologiczno-eksploatacyjne aspekty w procesie użytkowania i odnowy maszyn i urządzeń. Regeneracja części w ekologicznej eksploatacji maszyn. Inżynieria Rolnicza. Nr 3(210). Kraków. s. 217-223.
- Kukielka L.** 1990. SYMUL NAGN-nieliniowa symulacja i analiza procesu powierzchniowego nagniatania tocznego. Program komputerowy. Koszalin.

NUMERICAL SIMULATION OF PHYSICAL PHENOMENA DURING THE BURNISHING ROLLING IN REGENERATION OF PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Abstract. The paper involves computer analysis of physical phenomena occurring in the surface layer of parts of agricultural machinery during the burnishing rolling as the final operation in the process of regeneration. A subprogram - "symul-nagn" program temperature was used for analysis of the thermal fields' increment. The analysis of the state of strains and stresses was performed in the ansys/ls-dyna system. Developed applications allow to define the properties of the surface layer for the conditions of the process or vice versa, can determine the value of the technological parameters for the desired properties. This is necessary to the proper design of technological process of regeneration. Exemplary results of numerical simulation were presented.

Key words: burnishing rolling, simulation, ANSYS, SYMUL-NAGN, physical phenomena, surface layer

Adres do korespondencji:

Leon Kukielka; e-mail: leon.kukielka@tu.koszalin.pl
Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów
Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15-17
75- 620 Koszalin