

ANALIZA MOŻLIWOŚCI STEROWANIA ROZKŁADEM NAPRĘŻEŃ WYNIKOWYCH W WARSTWIE WIERZCHNIEJ ZĘBA KULTYWATORA PO KULOWANIU W ASPEKTCIE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Przemysław Bartosik, Marcin Szyc, Leon Kukiełka

Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. Praca dotyczy komputerowego modelowania i analizy numerycznej procesu kulowania strumieniowego w aspekcie możliwości sterowania rozkładem naprężeń wynikowych, ze względu na wytrzymałość zmęczeniową zęba kultywatora. Zastosowano przyrostowy, uaktualniony opis Lagrange'a oraz adekwatne miary odkształceń i naprężeń. Opracowano aplikację w systemie ANSYS, która pozwala określać stany odkształceń i naprężeń w dowolnym punkcie zęba i w dowolnej chwili trwania procesu kulowania. Materiał zęba traktowano jako ciało sprężysto/lepko-plastyczne z nieliniowym umocnieniem mieszanym, natomiast śrut jako ciało idealnie sztywne lub sprężyste. Badania przeprowadzono zgodnie z trójpoziomym planem eksperymentu. Wyznaczono rozkłady naprężeń własnych (ściskających) w warstwie wierzchniej zęba. Przedstawiono przykładowe wyniki analiz numerycznych. Wyniki symulacji aproksymowano równaniami regresji w postaci wielomianów stopnia drugiego. Określono zbiór rozwiązań kompromisowych dla zastępczego kryterium optymalizacji.

Słowa kluczowe: plan eksperymentu, modelowanie, naprężenia, Ansys, wytrzymałość zmęczeniowa

Wprowadzenie

Głównym celem stosowania kulowania strumieniowego jest umocnienie warstwy wierzchniej części maszyn podlegających zmiennym obciążeniom oraz narażonym na intensywne zużycie ścierne np. ząb kultywatora, lemiesz, odkładnica.

Stan warstwy wierzchniej ma znaczący wpływ na właściwości użytkowe elementów maszyn rolniczych. Podstawową właściwością użytkową, na którą wpływa kulowanie, jest wytrzymałość zmęczeniowa. Wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementów poddanych kulowaniu strumieniowemu związany jest głównie z ukształtowanymi przez tę obróbkę własnymi naprężeniami ściskającymi oraz utwardzeniem warstwy wierzchniej. Literatura [Przybylski 1979] podaje, że wpływ ściskających naprężeń własnych na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej wykazuje charakter zbliżony do zależności liniowej. Granica zmęczenia materiału, poprzez proces kulowania, może być zwiększona od kilkunastu do

kilkudziesięciu procent. Zastosowanie obróbki kulowaniem pozwoli zatem wydłużyć czas bezawaryjnej pracy zębów kultywatora.

Najkorzystniejszym przypadkiem jest, jeśli maksymalne naprężenia ściskające występują na powierzchni, gdyż pozwala na znaczne zwiększenie obciążenia zewnętrznego i jednocześnie wzrost wytrzymałości zmęczeniowej wyrobu. Głębokość zalegania naprężeń ściskających wynosi od kilkunastu setnych do około 1,5 mm [Przybylski 1979].

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest ocena możliwości świadomego kształtowania rozkładu naprężeń własnych pierwszego rodzaju (równoważących się w objętości wyrobu) w warstwie wierzchniej zęba kultywatora, poprzez zmianę prędkości oraz średnicy śrutu w procesie kulowania strumieniowego.

Metodyka

Symulacje numeryczne wykonano zgodnie z trójpoziomym planem eksperymentu, dla $N = 3^2 = 9$ (tabela 1). Wyniki badań aproksymowano wielomianem kwadratowym z podwójnymi interakcjami [Kukielka 2002]:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i \bar{x}_i + \sum_{i,j=1}^2 b_{ij} \bar{x}_i \bar{x}_j + \sum_{i=1}^2 b_{ii} \bar{x}_i^2, \quad (1)$$

gdzie \bar{x}_i ($i=1,2$) są zmiennymi wejściowymi w jednostkach naturalnych.

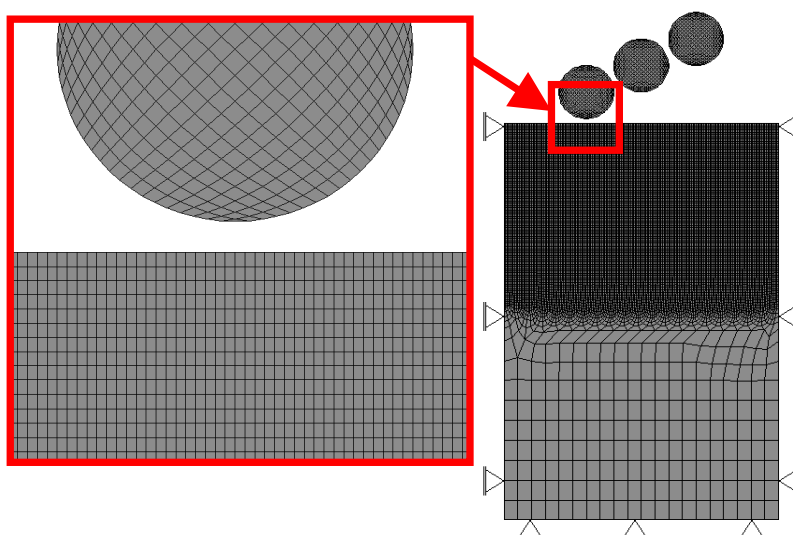
Tabela 1. Trójpoziomowy plan eksperymentu
Table 1. Three levels experiment design

Nr doświadczenia	Zmienne standaryzowane		Zmienne rzeczywiste	
	\bar{x}_1	\bar{x}_2	d [mm]	v [m·s ⁻¹]
1	+1	+1	3	100
2	+1	0	3	70
3	+1	-1	3	40
4	0	+1	2	100
5	0	0	2	70
6	0	-1	2	40
7	-1	+1	1	100
8	-1	0	1	70
9	-1	-1	1	40

Źródło: obliczenia własne autorów

Symulację numeryczną procesu kulowania przeprowadzono za pomocą opracowanej aplikacji w programie Ansys/LS-Dyna. Przyjęto płaski stan odkształceń i przestrzenny stan naprężeń. Średnicę śrutu zmieniano w zakresie $d=1\div 3$ mm, a jego prędkość początkową $v=40\div 100$ m·s⁻¹.

Symulowano 3 następujące po sobie uderzenia śrutu w powierzchnię obrabianą. Odległość między kulkami śrutu była równa ich średnicy. Zarówno warstwę wierzchnią materiału, jak i śrut dyskretyzowano za pomocą elementów skończonych typu PLANE 162. Model warstwy wierzchniej podzielono na ponad 15000 elementów skończonych, zagęszczonych w obszarze kontaktu, natomiast każdą kulkę - na 400 elementów skończonych. Na rysunku 2 przedstawiono model numeryczny obiektu wraz z warunkami brzegowymi (odebranymi stopniami swobody). Ponieważ zęby kultywatora, jako elementy poddawane zmiennym obciążeniom zginającym wykonywane są ze stali sprężynowej, w symulacjach przyjęto parametry stali 50S2 (tablica 2). Weryfikację poprawności modelu numerycznego wykonano za pomocą badań modelowych [Kowalczyk 1995].



Rys. 2. Dyskretny model numeryczny
Fig. 2. Discrete numerical model

Rysunek 3 przedstawia typowy rozkład naprężeń własnych występujących w warstwie wierzchniej materiału po procesie kulowania, wraz z zaznaczonymi parametrami, które zostały obliczone w symulacjach numerycznych. Były to wartości maksymalnych naprężeń ściskających (σ_{Ymax}), naprężeń na powierzchni materiału (σ_{Ypow}), głębokość zalegania naprężeń maksymalnych (g_1) oraz głębokość warstwy umocnionej (g_2).

Wykorzystując wyznaczone równania regresji opracowano skalaryzującą, addytywną funkcję celu w postaci [Tarnowski 2001]:

$$F_{\text{cel}} = \left| \frac{\sigma_{Y_{\text{max}_o}} - \sigma_{Y_{\text{max}}}(d, v)}{\sigma_{Y_{\text{max}_o}}} \right| \cdot w_1 + \left| \frac{\sigma_{Y_{\text{pow}_o}} - \sigma_{Y_{\text{pow}}}(d, v)}{\sigma_{Y_{\text{pow}_o}}} \right| \cdot w_2 + \left| \frac{g_{1_o} - g_1(d, v)}{g_{1_o}} \right| \cdot w_3 + \left| \frac{g_{2_o} - g_2(d, v)}{g_{2_o}} \right| \cdot w_4, \quad (2)$$

gdzie $\sigma_{Y_{\text{max}_o}}$, $\sigma_{Y_{\text{pow}_o}}$, g_{1_o} , g_{2_o} są oczekiwanymi wartościami parametrów, w_1, w_2, w_3, w_4 są współczynnikami (wagami), przyjęto również ograniczenia dla zmiennych decyzyjnych:

$$1 \leq d \leq 3, \quad [mm] \quad 40 \leq v \leq 100 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

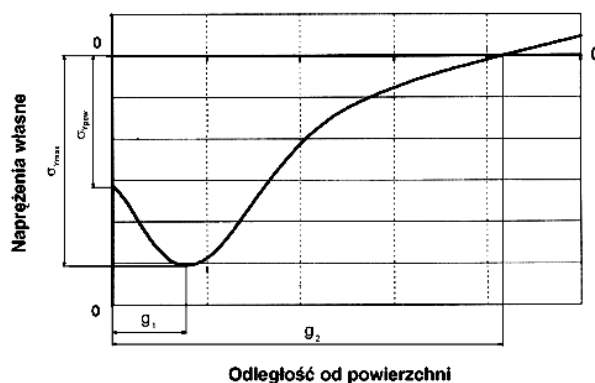
Funkcję celu optymalizowano za pomocą gradientowych funkcji optymalizacyjnych.

Tabela 2. Parametry materiałowe

Table 2. Material parameters

Parametr	Stal 50S2	Śrut - St 170	Jednostki SI
Gęstość	7850	7800	[kg m ⁻³]
Moduł Younga	200	206	[GPa]
Współczynnik Poissona	0,3	0,29	[-]
Granica sprężystości	1080	-	[MPa]
Moduł umocnienia	1280	-	[MPa]
Współczynnik umocnienia	1	-	[-]
Parametr (c)	40	-	[-]
Parametr (p)	5	-	[s ⁻¹]
Naprężenia krytyczne	0,75	-	[-]

Źródło: obliczenia własne autorów



Rys. 3. Typowy rozkład i parametry naprężeń własnych w warstwie wierzchniej
Fig. 3. Typical stresses distribution with estimated parameters

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki symulacji (tabela 3) aproksymowano przy wykorzystaniu programu EPLAN-
NER otrzymując następujące równania regresji:

$$\sigma_{y_{max}} = -347 - 349 \cdot d + 1,67 \cdot v + 1,02 \cdot d \cdot v + 45,7 \cdot d^2 - 0,0463 \cdot v^2, \quad (4)$$

$$\sigma_{y_{pow}} = -82,3 + 20,4 \cdot d - 5,4 \cdot v - 0,0737 \cdot d \cdot v - 25 \cdot d^2 + 0,0178 \cdot v^2, \quad (5)$$

$$g_1 = -0,15 - 0,0313 \cdot d + 0,0066 \cdot v + 0,00139 \cdot d \cdot v + 0,0174 \cdot d^2 - 4,78 \cdot 10^{-5} \cdot v^2, \quad (6)$$

$$g_2 = -0,253 + 0,137 \cdot d + 0,0043 \cdot v + 0,00733 \cdot d \cdot v - 0,0139 \cdot d^2 - 1,17 \cdot 10^{-5} \cdot v^2. \quad (7)$$

Dla poziomu istotności $\alpha=0,05$ oba czynniki wejściowe mają istotny wpływ na czynnik wyjściowy. Zarówno w przypadku naprężeń maksymalnych (pod powierzchnią), jak i występujących na powierzchni zęba, wzrost prędkości początkowej śrutu oraz jego średnicy powoduje zwiększanie wartości naprężeń ściskających. Również w przypadku głębokości zalegania naprężeń maksymalnych i głębokości warstwy umocnionej wzrost wartości obu badanych czynników powoduje wzrost wartości badanych parametrów warstwy wierzchniej. Graficzną interpretację równań (4)÷(7) przedstawia rysunek 4.

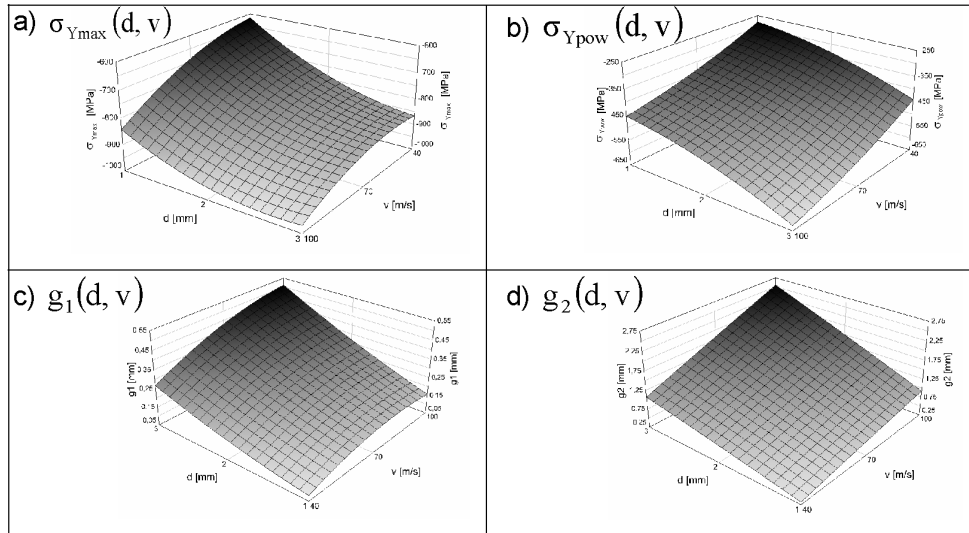
Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej zęba, dla symulacji nr 3. Jest on zgodny z rozkładem teoretycznym, podanym w literaturze [Przybylski 1979].

Tabela 3. Zestawienie wyników

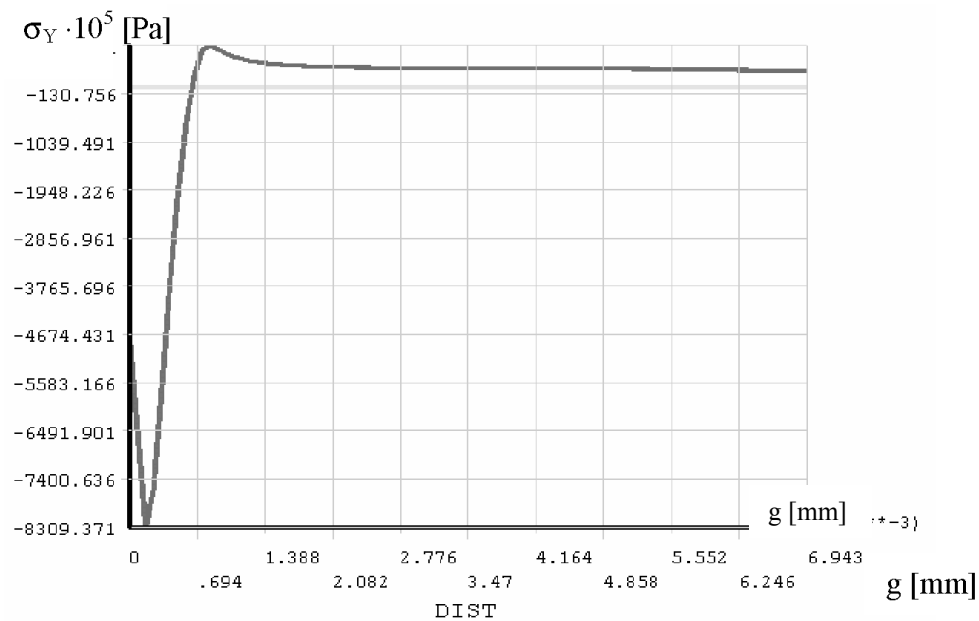
Table 3. Results list

Numer symulacji	Czynniki wejściowe		Wyniki			
	d [mm]	v [m·s ⁻¹]	$\sigma_{y_{max}}$ [MPa]	$\sigma_{y_{pow}}$ [MPa]	g_1 [mm]	g_2 [mm]
1	1	40	-615,59	-287,04	0,0917	0,332
2	2	40	-824,74	-310,61	0,167	0,546
3	3	40	-830,94	-457,13	0,242	0,689
4	1	70	-648,74	-392,5	0,138	0,607
5	2	70	-836,65	-431,36	0,25	1,13
6	3	70	-909,32	-553,22	0,483	1,74
7	1	100	-883,64	-435,6	0,167	0,921
8	2	100	-908,07	-552,92	0,333	1,71
9	3	100	-976,29	-614,54	0,483	2,58

Źródło: obliczenia własne autorów



Rys. 4. Graficzna interpretacja równań regresji
 Rys. 4. Regression equations graphic interpretation



Rys. 5. Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej materiału dla symulacji nr 3
 Fig. 5. Stresses distribution in surface layer for simulation number 3

Analiza możliwości sterowania...

W tabeli 4 zestawiono przykładowe wyniki optymalizacji funkcji celu oraz optymalne parametry procesu kulownia, tzn. takie, dla których suma ilorazów różnic między wymaganymi a obliczonymi wartościami parametrów warstwy wierzchniej i odpowiednimi wagami jest najmniejsza.

Tabela 4. Przykładowe wyniki optymalizacji funkcji celu
Table 4. Examples of objective function optimization

Wyszczególnienie	Nr doświadczenia									
	1		2		3		4		5	
	W.	O.	W.	O.	W.	O.	W.	O.	W.	O.
v [$m \cdot s^{-1}$]	-	100	-	69,88	-	70,02	-	77,43	-	70,01
d [mm]	-	2,26	-	1,07	-	2,58	-	3	-	2,15
σ_{Ymax} [MPa]	-700	-997	-700	-700	-700	-868	-700	-893	-700	-842
w_1	0,1	-	0,7	-	0,2	-	0,3	-	0,3	-
σ_{Ypow} [MPa]	-500	-542	-500	-385	-500	-500	-650	-575	-650	-456
w_2	0,1	-	0,1	-	0,6	-	0,5	-	0,2	-
g_1 [mm]	0,3	0,364	0,3	0,167	0,3	0,363	0,3	0,459	0,3	0,3
w_3	0,2	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,4	-
g_2 [mm]	2	1,958	2	0,667	2	1,577	2	2	2	1,33
w_4	0,6	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-

W. – wymagane; O. – obliczone

Źródło: obliczenia własne autorów

Wnioski

1. Opracowana aplikacja w programie ANSYS/LS-Dyna pozwala na symulację naprężeń własnych występujących w warstwie wierzchniej materiału w dowolnej chwili realizacji procesu kulowania.
2. Zarówno prędkość początkowa śrutu, jak i jego średnica mają istotny wpływ na wartość i rozkład naprężeń w warstwie wierzchniej materiału.
3. Możliwe jest świadome sterowanie rozkładem naprężeń własnych w warstwie wierzchniej zęba przy sterowaniu prędkością początkową i średnicą śrutu. Należy jednakże przeprowadzić dalsze badania, uwzględniające większą liczbę czynników wejściowych, np. odległość między uderzeniami śrutu, kolejność uderzeń śrutu itp.

Bibliografia

- Kowalczyk L.** 1995. Modelowanie fizyczne procesów obróbki plastycznej. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom. ISBN 83-86148-38-1.
- Kukielka L.** 2002. Podstawy badań inżynierskich. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa. ISBN 83-01-13749-5.
- Przybylski W.** 1979. Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa. ISBN 83-204-0010-4.
- Tarnowski W.** 2001. Symulacja i optymalizacja w MATLAB'ie. WSM. Gdynia. ISBN 83-87438-81-2.

ANALYSIS OF SPRING-TINE CULTIVATOR SURFACE LAYER STRESSES DISTRIBUTION CONTROL POSSIBILITY AFTER SHOT PEENING PROCESS IN FATIGUE STRENGTH ASPECT

Abstract. Computer modeling and numerical analysis of shoot peening process in control possibility of stresses distribution (for the sake of fatigue strength of spring-tine) aspect were the aims of the work. Incremental Lagrange formulation and adequate measures of stresses and strains were used in the paper. The application in Ansys program, allowed determination the stains of stresses and strains in any point of spring-tine and any time during the process, was created. The spring-tine material was treated as a elastic/viscous-plastic body with nonlinear mixed hardening. Although the shoot was considered as ideally rigid or elastic body. Simulations were carried out basis on three levels experiment design. Examples of numerical analysis results of compressing stresses distributions in spring-tine surface layer were shown. Simulations results were approximated by regression equations in square polynomial form. Compromising solutions set for substitute optimization criterion were defined.

Key words: experiment design, modeling, stresses, Ansys, fatigue strength

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