

## COMPUTER MODELLING AND SIMULATION OF THE PHYSICAL PHENOMENA IN SHOT PEENING PROCESS OF CULTIVATOR TINE

### Summary

This work concerns modeling and numerical simulations of shot peening process of cultivator tine fragment. The application was elaborated in Ansys/LS – Dyna programme to observe physical phenomena in contact zone of tool-work pieces during the simulations time. The researches regarded an influence of the distance of the traces on the deformation and strain state in the surface layer of cultivator tine. Exemplary results of numerical analysis, were presented.

## KOMPUTEROWE MODELOWANIE I SYMULACJA ZJAWISK FIZYCZNYCH W PROCESIE KULOWANIA ZĘBA SPRĘŻYNOWEGO KULTYWATORA

### Streszczenie

Praca dotyczy modelowania komputerowego i symulacji numerycznych procesu kulowania strumieniowego zęba kultywatora. Opracowano aplikację w programie Ansys/LS-Dyna do symulacji czasowej zjawisk fizycznych zachodzących w strefie kontaktu kulki z zębem. Badano wpływ odległości śladów kulek (intensywność kulowania) na stan deformacji i naprężeń zastępczych w warstwie wierzchniej wyrobu. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznych.

### 1. Wstęp

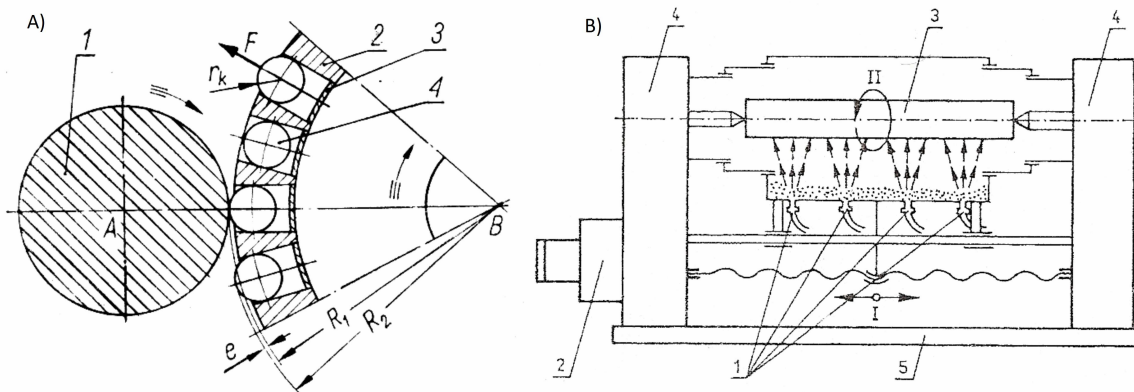
Głównym problemem we współczesnych technikach wytwarzania jest zagadnienie poprawienia jakości technologicznej wyrobu przy jednoczesnej minimalizacji kosztów [1, 2]. Jak wynika z wielu przeprowadzonych badań, w 80% przypadków inicjacja uszkodzeń w elementach pracujących w ciężkich warunkach eksploatacyjnych znajduje się w warstwie wierzchniej. W okresie ostatnich kilkunastu lat nastąpił dynamiczny rozwój obróbek plastycznych, które kształtują warstwę wierzchnią (własności mechaniczne, chemiczne, chropowatość powierzchni itp.). Jedną z odmian obróbek plastycznych jest dynamiczna obróbka nagniataniem poprzez kulowanie. Obróbka ta znalazła szerokie zastosowanie w nagniataniu elementów o skomplikowanych kształtach. Jednym z nich jest ząb kultywatora, który ze względu na złożoną geometrię może być poddany wyłącznie strumieniowym obróbkom umacniającym.

### 1.1. Charakterystyka procesu kulowania

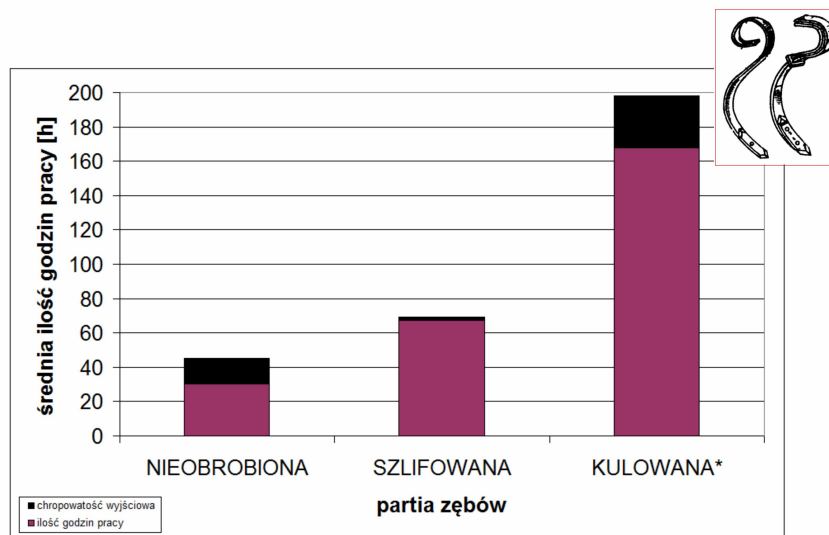
Obróbka nagniataniem dynamicznym (kulowaniem) pojawiła się w latach trzydziestych i czterdziestych ubiegłego stulecia [3, 4]. Wielki wpływ na jej rozwój miały prace J.O. Almena, który sterując parametrami technologicznymi procesu badał wytrzymałość zmęczeniową przedmiotów poddanych tej obróbce.

W Polsce pierwsze prace na temat obróbki poprzez kulowanie pojawiły się w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku. Dotyczyły one zarówno nagniatania odśrodkowego (skoncentrowanego) jak i rozproszonego (strumieniowego) – rys. 1.

Zasadniczą różnicą między tymi sposobami obróbki jest charakter kontaktu przedmiotu obrabianego z medium umacniającym (kulka).



Rys. 1. Rodzaje obróbki nagniataniem dynamicznym: kulowanie odśrodkowe (A), kulowanie rozproszone (B) [3, 4]  
Fig. 1. Types of dynamic burnishing processes: centrifugal shot – peening(A), distracted shot peening(B) [3, 4]



Rys. 2. Wyniki badania wytrzymałości zmęczeniowej dla trzech partii zębów sprężynowych kultywatora  
 Fig. 2. Results of fatigue strength tests of three batches of cultivator tines

W przypadku metody rozproszonej elementy nagniatające stanowią nieuporządkowany strumień kulek (różny kąt natarcia na powierzchnię nagniataną, stochastyczny rozkład odcisków na powierzchni). Natomiast w metodzie skoncentrowanej powierzchnia nagniatana jest w sposób uporządkowany (podobne kąty natarcia, regularny bądź powtarzający się charakter pozostawiania śladów).

### 1.2. Zjawiska zachodzące podczas nagniatania dynamicznego rozproszonego

Medium umacniające (kulka), zderzając się z powierzchnią obrabianą powoduje powstanie odkształceń sprężysto-plastycznych w warstwie wierzchniej (WW) materiału. W wyniku zagłębienia się kulki na pewną głębokość WW następuje jej odbicie wskutek działania sił sprężystości. Prędkość kulki po odbiciu się od powierzchni jest równa iloczynowi wartości prędkości przed uderzeniem (prędkość początkowa medium umacniającego) i współczynnika restytucji (jego wartość waha się w granicach  $0 \div 1$ ). Zmniejszenie prędkości kulki po uderzeniu w stosunku do prędkości początkowej spowodowane jest skumulowaniem w materiale części energii kinetycznej (dyssypacja), która powoduje powstanie odkształceń i naprężeń zastępczych. Skumulowana energia kinetyczna w materiale jest sumą energii odkształcenia plastycznego (około 90% tej energii zamieniana jest na ciepło, natomiast tylko około 10% pozostaje w materiale) i pracy sił tarcia, wywoływanej na wskutek tarcia między kulką a przedmiotem obrabianym oraz tarciami między ziarnami.

### 1.3. Użytkowe skutki nagniatania dynamicznego

Kulowanie strumieniowe tak też jak inne odmiany nagniatania dynamicznego, stosowane są głównie w celu podniesienia wytrzymałości zmęczeniowej elementów obrabianych. Wzrost odporności na zmęczenie materiału zależy przede wszystkim od materiału nagniatanego. Z przeprowadzonych badań [5] wynika, iż z trzech elementów wykonanych z brązu, stali średniowęglowej i stopu aluminium, największy wzrost wytrzymałości zmęczeniowej osiągnęły próbki z brązu (131%). Zauważono także zasad-

niczą różnicę wzrostu wytrzymałości na zmęczenie w przypadku zastosowania dwóch różnych odmian nagniatania (kulowanie, mikrokulowanie). Z porównania odporności na zmęczenie wynikało, że dla elementów mikrokulowanych odnotowano większy wzrost odporności niż w przypadku kulowanych [5].

Również warunki technologiczne procesu kulowania mają wpływ na wytrzymałość zmęczeniową obrabianych przedmiotów. Według literatury [5] zastosowanie śrutu odlewanego o średnicy 0,92 mm powoduje większy wzrost granicy zmęczenia badanych próbek niż po nagniataniu śrutem o średnicy 0,39 mm.

W porównaniu z innymi procesami mającymi na celu umocnienie materiału, kulowanie jest jedną z najskuteczniejszych metod obróbkowych (jedną z najlepiej poprawiających wytrzymałość zmęczeniową wśród obróbek plastycznych na zimno). Zalety procesu kulowania można odwołać do niżej przedstawionych badań.

Partie zębów (partia nie poddana żadnej obróbce, partia szlifowana, partia kulowana) poddane zostały badaniom na wytrzymałość zmęczeniową. Dzięki zastosowaniu nagniatania dynamicznego odporność na zmęczenie elementu kultywatora wzrosła kilkakrotnie w porównaniu z partią szlifowaną bądź obrobioną cieplnie (rys. 2). Średnia liczba godzin pracy partii kulowanej (do uszkodzenia elementu zęba) na stanowisku badawczym do badania wytrzymałości zmęczeniowej wyniosła średnio 168 h. Jedynym mankamentem mogła być chropowatość powierzchni, która wzrosła dwukrotnie  $30 \mu\text{m}$  do stanu powierzchni na wejściu (partia nieobrobiona -  $15 \mu\text{m}$ ). Znaczną poprawę chropowatości zaobserwowano w partii szlifowanej ( $2 \mu\text{m}$ ).

## 2. Analiza numeryczna procesu kulowania

Symulacje procesu kulowania zębów kultywatora przeprowadzono dla następujących danych. Fragment zęba kultywatora ze stali sprężynowej 50S2 o wymiarach: długość  $L=100 \text{ mm}$ , grubość  $g=10 \text{ mm}$  oraz o promieniu zaokrąglenia elementu  $R90$ , kulowano kulkami o średnicy  $D=16 \text{ mm}$ . Prędkość początkowa kulek wynosiła  $60 \text{ m/s}$ . Element zęba kulowano dwoma sposobami: uderzenie kulek w odległości promienia kulki ( $D/2$ ) oraz w równych średnicy kulki ( $D$ ). Do nagniatania wybrano frag-

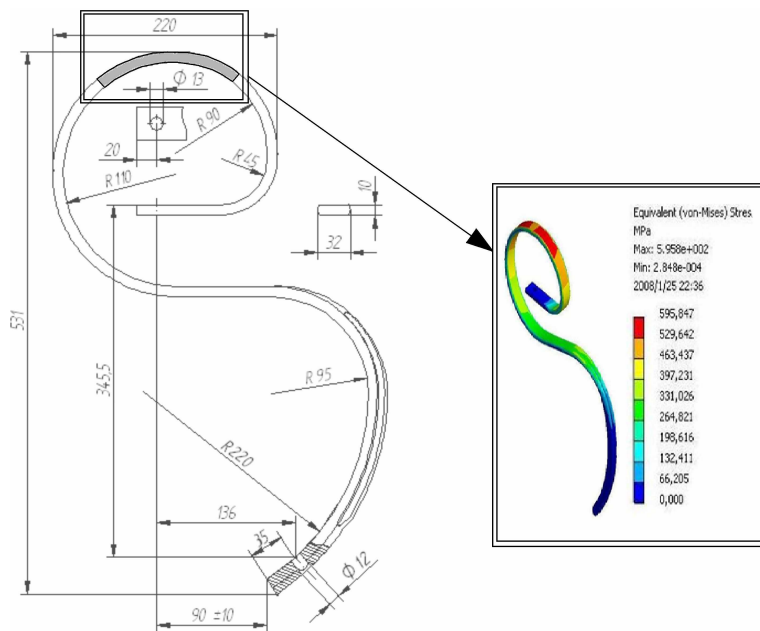
ment zęba, w którym podczas pracy kultywatora występują największe wartości naprężeń zastępczych (najczęstsze miejsce uszkodzenia zęba) (rys. 3). Element zęba kultywatora modelowano jako materiał sprężysto-lepko-plastyczny. Dyskretyzowano go elementami czworokątnymi 8-węzłowymi (2D Solid 162) oraz podzielono na 10000 elementów skończonych. Natomiast kulkę definiowano jako materiał nieodkształcalny oraz dyskretyzowano elementami trójkątnymi 6-węzłowymi (każda kulka podzielona była na 84 elementy skończone). Element zęba utwierdzono jak na rys. 3. Ponadto założono, że proces jest izotermiczny, a powierzchnie kulek i przedmiotu są idealnie gładkie.

Prognozowanie struktury geometrycznej wyrobu jest jednym z nierozwiązanych problemów obróbki. Dlatego też badania symulacyjne przeprowadzono w celu określenia

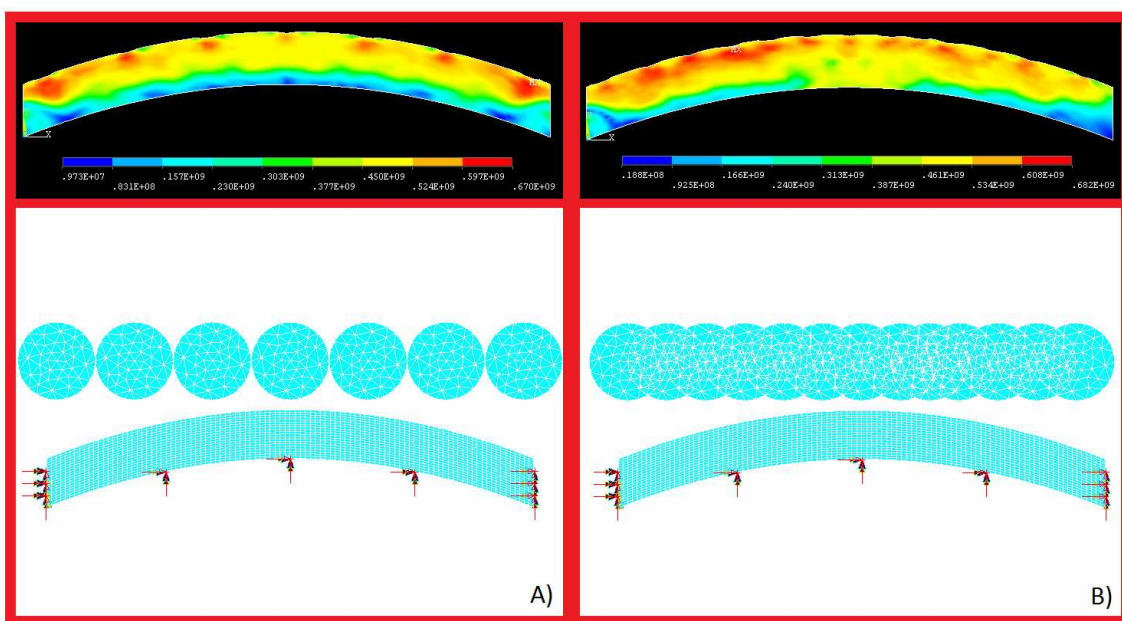
wpływu odległości pozostawiania śladów na stany naprężeń zastępczych oraz deformacji w warstwie wierzchniej wyrobu po kulowaniu. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4.

### 3. Wnioski

Zwiększenie intensywności kulowania (zmniejszenie odstępów pozostawiania śladów) powoduje nieznaczny wzrost maksymalnych naprężeń zastępczych ( $\sigma_z = 682$  MPa - dla odległości śladów  $l = D/2 = 8$  mm oraz  $\sigma_z = 671$  MPa - dla  $l = D = 16$ ) mm, ale jednocześnie znacznie wpływa na stereometrię powierzchni, głębokość zalegania oraz charakter rozkładu naprężeń ściskających.



Rys. 3. Fragment zęba, który został poddany nagniataniu poprzez kulowanie  
Fig. 3. Fragment of the cultivator tine put to the shot peening process



Rys. 4. Mapy naprężeń zastępczych dla różnych odległości pozostawiania śladów:  $l = 16$  mm (a),  $l = 8$  mm (b)  
Fig. 4. Maps of stress intensity for different spaces of left traces:  $l = 16$  mm (a),  $l = 8$  mm (b)

Na głębokości około 2 mm elementu nagniatanego, dla mniejszej intensywności kulowania można zauważyć „punktowe” lokalizacje maksymalnych naprężeń (rys. 4A). Natomiast zmniejszenie odległości pozostawiania śladów pozwala osiągnąć w warstwie wierzchniej ciągłość maksymalnych wartości naprężeń na całej długości elementu kulowanego (rys. 4B).

W badanych dwóch przypadkach wraz ze zmniejszaniem odległości pozostawiania śladów wysokość powstających wypływek wzrasta. Jednak przy dalszym zmniejszaniu odległości śladów nastąpi ich pokrycie, a zatem i zmniejszenie wysokości wypływek. Dlatego też intensywność nagniatania ma decydujący wpływ na stereometrię obrabianej powierzchni.

Otrzymane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania symulacji komputerowych procesu kulowania zęba kultywatora do projektowania procesu technologicznego. Analizy numeryczne wykazały możliwość sterowania własnościami mechanicznymi WW elementów, co pozwoli na dobranie takich warunków kulowania, które zapewnią otrzymanie wyrobu o pożą-

danych (do danych warunków eksploatacji) właściwościach warstwy wierzchniej.

#### 4. Literatura

- [1] Pogorzelska P., Rusak D., Kukielka L.: Możliwości zastosowania systemów Ansys i Abaqus do symulacji procesów kulowania powierzchni płaskich. IX Forum Motoryzacji. Słupsk 2006, s. 259-266.
- [2] Pogorzelska P., Rusak D., Kukielka L.: Analiza numeryczna przemieszczeń i odkształceń zachodzących w warstwie wierzchniej przedmiotu podczas procesu kulowania. IX Forum Motoryzacji. Słupsk 2006, s. 249-258.
- [3] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. Warszawa: WNT, 1987.
- [4] Nakonieczny A.: Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna – kulowanie – shot peening. Warszawa, 2002.
- [5] Zaleski K.: Kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej metali w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego. Lublin, 2008.