

PATYK Radosław<sup>1</sup>  
KUŁAKOWSKA Agnieszka<sup>2</sup>

## MODELOWANIE PROCESU KULKOWANIA CZĘŚCI MASZYN

*Praca dotyczy modelowania komputerowego i symulacji procesu kulkowania strumieniowego części maszyn. Opracowano aplikację programie ANSYS/LS-DYNA do symulacji czasowej zjawisk fizycznych zachodzących w strefie kontaktu elementu nagniatającego z przedmiotem obrabianym. Badano wpływ wzajemnej odległości uderzeń kulek od siebie na stan naprężeń i odkształceń trwałych w przedmiocie obrabianym. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznych.*

## MODELLING OF SHOT PEENING PROCESS OF MACHINE PARTS

*The work is about computer modeling and simulation of shot peening of the machine parts. The application in ANSYS/LS-DYNA program to time simulation of physical phenomena which occur in contact zone of burnishing element with worked object. The effect of the mutual distance from each other beats balls on the state of permanent stress and strain in the workpiece. The exemplary results of numerical simulation are presented.*

### 1. WPROWADZENIE

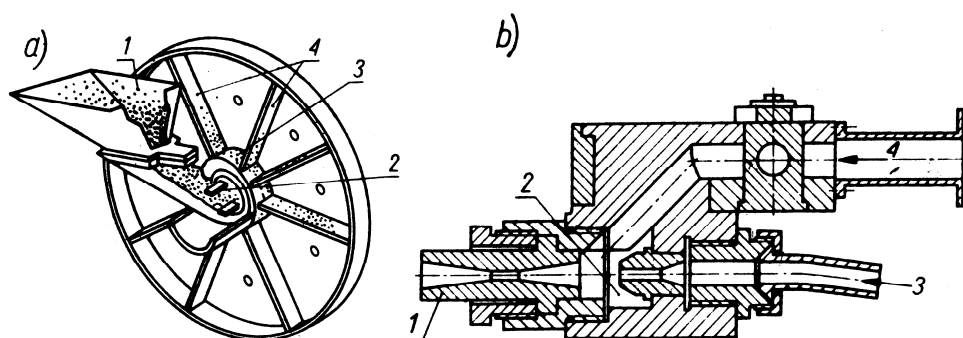
Ważnym problemem we współczesnych technikach wytwarzania jest zagadnienie poprawiania jakości technologicznej wyrobu przy jednoczesnej minimalizacji kosztów. Z badań wynika, że największy wpływ na jakość użytkową wyrobu ma warstwa wierzchnia, która źle ukształtowana jest przyczyną powstawania ponad 80% uszkodzeń części, ponadto może być przyczyną wzrostu oporów a przez to i utraty energii o ok. 50%. Dlatego też niezwykle istotnym jest aby na obróbki wykończeniowe części stosować takie technologie, które wydatnie poprawiają właściwości warstwy wierzchniej i jednocześnie nie powodują znacznego wzrostu kosztów wytwarzania. Niedocenianymi powierzchniowymi obróbkami, które umożliwiają kształtowanie warstw wierzchnich o korzystnych właściwościach są obróbki plastyczne. Jedną z nich stosowanych do obróbki części o powierzchniach krzywoliniowych jest kulkowanie. Kulkowanie strumieniowe, czy też śrutowanie przeprowadza się za pomocą drobnego okrągłego śrutu, uderzającego w powierzchnię z dużą prędkością. Kulkowanie jest najbardziej uniwersalną metodą wytwarzania naprężeń własnych, znajdującą zastosowanie do wszelkich metali i kształtów,

<sup>1</sup>Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

<sup>2</sup>Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

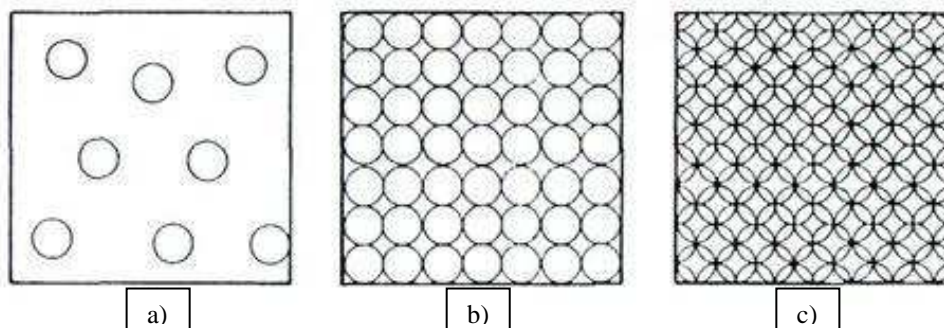
z wyjątkiem wnętr otworów lub zamkniętych naczyń, do których kulki nie mają dostępu.

Srednica kulek waha się w granicach  $d=0,18 \div 4,45$  mm przy czym kulki o skrajnych wielkościach są w użyciu bardziej kłopotliwe, duże kulki stosowane są do wytwarzania naprężeń ściskających w warstwach o większych grubościach, małe natomiast – do umacniania materiału w zaokrąglonych wgłębieniach o małym promieniu. Prędkości kulek wynoszą od  $V = 40 \div 90$  m/s. Prędkość nadaje się w sposób mechaniczny za pomocą wirnika lub sprężonego powietrza (rys. 1)



Rys. 1. Urządzenie do śrutownia: a) w sposób mechaniczny; 1 – kosz, 2 – wirniki, 3 – wlot śrutu między łopatki, 4 – łopatki, b) w sposób pneumatyczny, 1- dysza, 2 – komora przyspieszania, 3 – wlot powietrza, 4 – doprowadzenie śrutu [1, 4]

Grubości wytwarzanych warstwek z naprężeniami ściskającymi sięgają od kilku tysięcznych do ok. milimetra, w zależności od rozmiaru zastosowanych kulek oraz wartości prędkości. W warstwach tych największe naprężenie występuje blisko powierzchni. Chropowatość powierzchni jaką się otrzymuje po procesie kulkowania zawiera się w granicach  $R_a=40 \div 1,25$   $\mu\text{m}$ . Dla przypadków kulkowania przedmiotów o twardości ok. 60 HRC powierzchnia wstępnie obrobiona do chropowatości  $R_a=0,63 \div 0,32$   $\mu\text{m}$  zachowuje tę samą chropowatość po obróbce. Ta stosunkowo prosta metoda obróbki umożliwia znaczne zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej części maszyn. Kulkowanie stosowane jest między innymi do rozbijania austenitu szczątkowego, który często występuje w stalach narzędziowych po obróbce cieplnej. Kulkowanie najczęściej stosuje się do obróbki wykończeniowej sprężyn, wałków skrętnych, matryc, pierścieni łożysk tocznych, spoin spawalniczych oraz między innymi do zmniejszenia porowatości korpusów urządzeń hydraulicznych. Stwierdzono, że kulkowanie wałka w miejscu jego wciskania w otwór może spowodować podwyższenie tego trwałości o ok. 90% w porównaniu z wałkiem szlifowanym i wciskany w otwór. W celu uzyskiwania korzystnych efektów procesu kulkowania, należy proces ten przeprowadzać w odpowiedni sposób [1, 4]. Na rysunku 2 przedstawiono schematy o zróżnicowanym stopniu pokrycia.

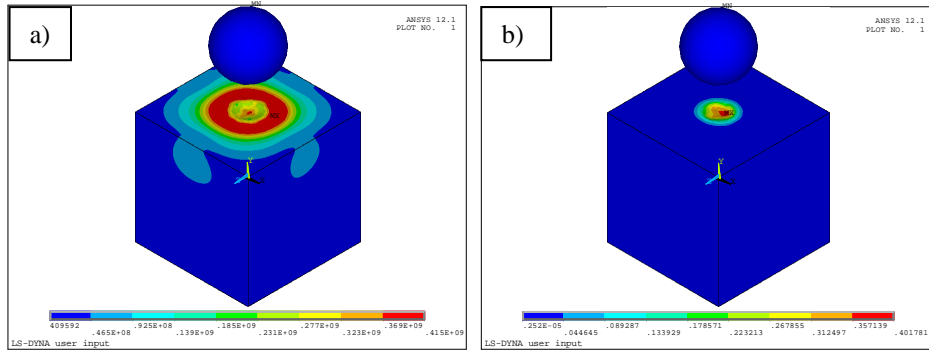


Rys. 2. Schemat powierzchni o zróżnicowanym stopniu pokrycia: a - niedopuszczalne, b - nieprawidłowe, c - prawidłowe; efekt kulowania najkorzystniejszy [4]

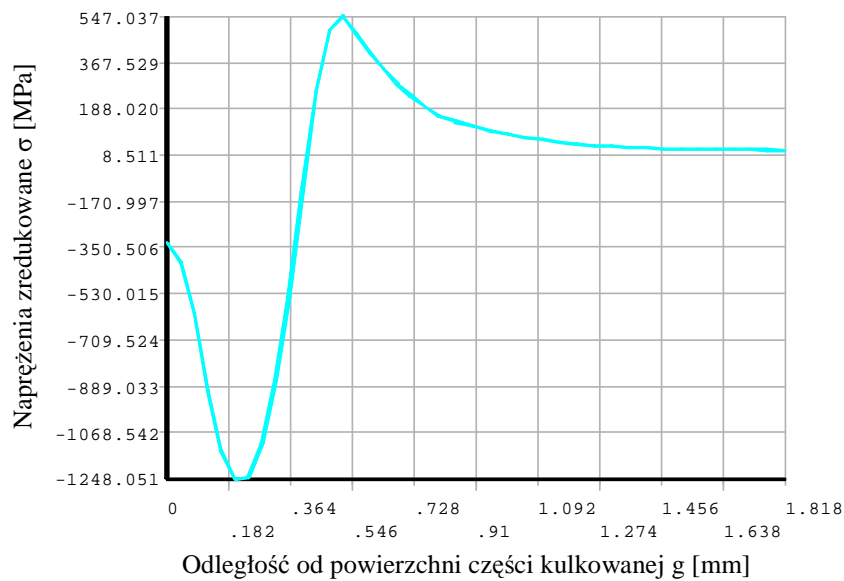
W celu analizy wpływu kulowania na stan warstwy wierzchniej oraz wpływu stopnia pokrycia powierzchni w procesie kulowania na stan naprężeń i odkształceń trwałych w warstwie wierzchniej przeprowadzono symulacje komputerowe procesu. Symulacje komputerowe przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych.

## 2. ANALIZY NUMERYCZNE

W pracy przeprowadzono dwa badania procesu kulowania części: w pierwszym badano wpływ procesu kulowania na rozkład naprężeń własnych w obrabianej warstwie wierzchniej. Przeprowadzono symulacje wpływu procesu pojedynczego uderzenia kulki w powierzchnię części obrabianej. W przypadku drugim badano wpływ odległości środków uderzeń kulek od siebie na stan naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej obrabianej części. W tym celu opracowano aplikacje w programie ANSYS/LS-Dyna umożliwiające zmianę średnic kulek, zmianę modelu materiałowego części obrabianej, zmianę prędkości początkowej kulek i inne. W przeprowadzonej analizie, jako materiał obrabiany zastosowano model sprężysto/lepko-plastyczny z umocnieniem liniowym o parametrach odpowiadających stali narzędziowej 1.2063. W każdym z analizowanych przypadków kulki zamodelowano, jako stalowe o średnicy  $d=1$  mm, o prędkości początkowej równej  $V = 40$  m/s, w symulacji przyjęto, że kulki są idealnie sztywne i nieodkształcalne ( $E \rightarrow \infty$ ) [2, 3]. Przykładowe wyniki symulacji procesu pojedynczego uderzenia kulki w powierzchnię części maszyn przedstawiono na rysunku 3, zaś rozkład naprężeń wewnątrz warstwy wierzchniej dla analizowanego procesu przedstawiono na rysunku 4.

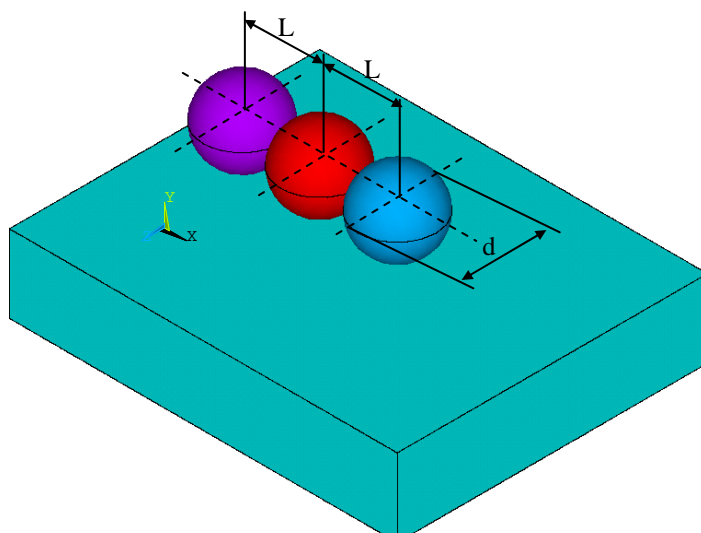


Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych a) oraz odkształceń zredukowanych b) po pojedynczym uderzeniu kulki o średnicy  $d = 1$  mm w powierzchnię obrobioną z prędkością początkową  $V=40$  m/s



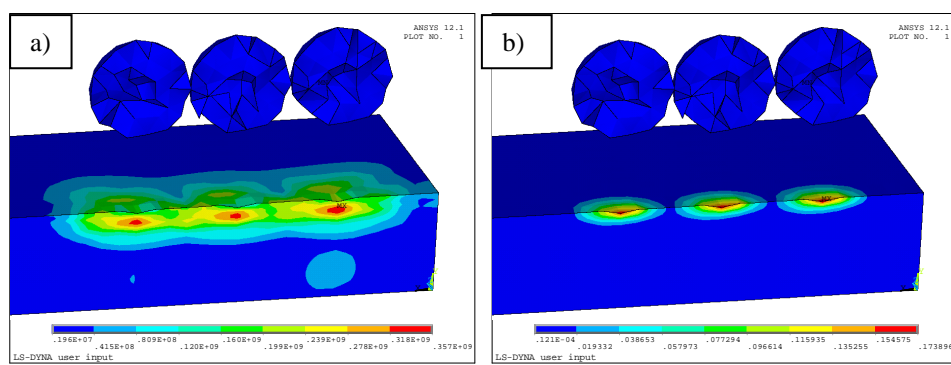
Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych w funkcji odległości od powierzchni  $\sigma=f(g)$  po pojedynczym uderzeniu kulki o średnicy  $d = 1$  mm w powierzchnię obrobioną z prędkością początkową  $V=40$  m/s

W celu sprawdzenia wpływu stopnia pokrycia powierzchni na stan warstwy wierzchniej po procesie kulkowania opracowano model fizyczny, matematyczny i komputerowy procesu. Badano wpływ odległości środków uderzeń kulek  $L$  od siebie na stan naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej. Model bryłowy procesu przedstawiono na rysunku 5.

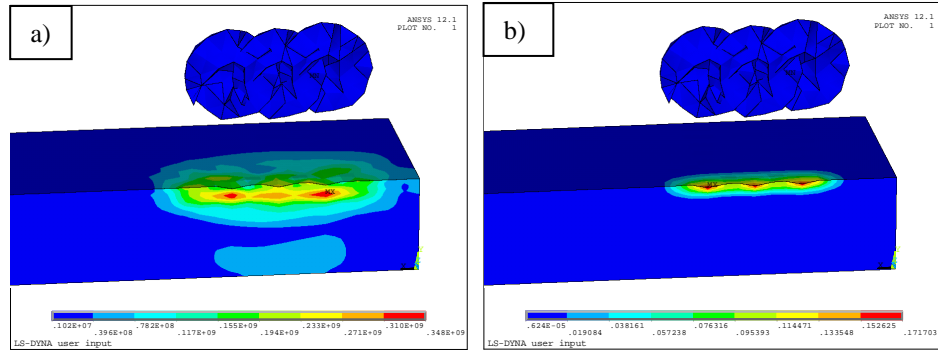


Rys. 5. Model bryłowy procesu kulowania

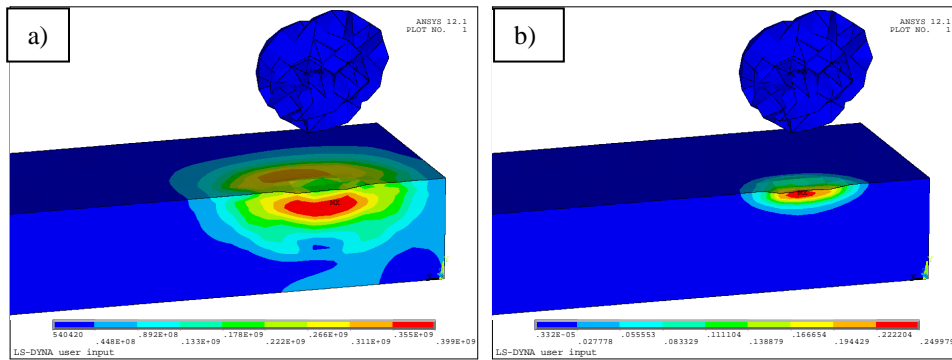
Wyniki rozkładu naprężeń przy wybranych odległościach uderzeń kulek od siebie przedstawiono na rysunkach 6, 7, 8 i 9.



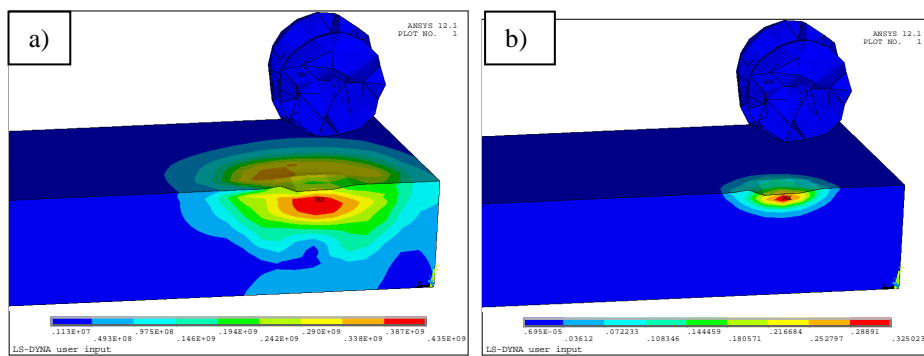
Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych a) oraz odkształceń zredukowanych b) po kulowaniu powierzchni kulkami o średnicy  $d = 1$  mm wyrzucanymi z prędkością początkową  $V=40$  m/s dla odległości uderzeń kulek od  $L=2r=d$



Rys. 7. Rozkład naprężeń zredukowanych a) oraz odkształceń zredukowanych b) po kulkowaniu powierzchni kulkami o średnicy  $d = 1$  mm wyrzucanymi z prędkością początkową  $V=40\text{m/s}$  dla odległości uderzeń kulek od  $L=r=d/2$

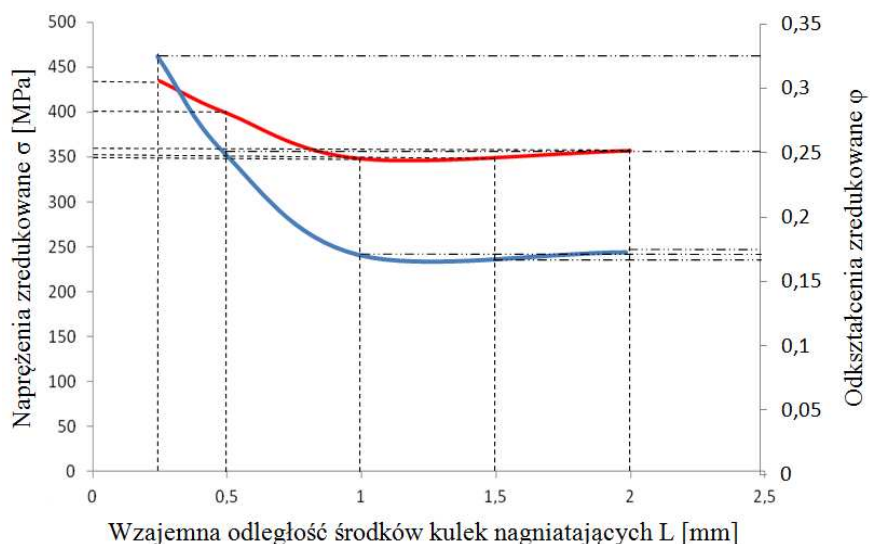


Rys. 8. Rozkład naprężeń zredukowanych a) oraz odkształceń zredukowanych b) po kulkowaniu powierzchni kulkami o średnicy  $d = 1$  mm wyrzucanymi z prędkością początkową  $V=40\text{m/s}$  dla odległości uderzeń kulek od  $L=r/2=d/4$



Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych a) oraz odkształceń zredukowanych b) po kulkowaniu powierzchni kulkami o średnicy  $d = 1$  mm wyrzucanymi z prędkością początkową  $V=40\text{m/s}$  dla odległości uderzeń kulek od  $L=r/4=d/8$

Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych przedstawiono na wykresie (rys. 10).



Rys. 10. Rozkład naprężeń zredukowanych oraz odkształceń zredukowanych po kulowaniu powierzchni kulkami o średnicy  $d = 1$  mm wyrzucanymi z prędkością początkową  $V=40$  m/s dla różnych odległości uderzeń kulek od siebie

### 3. WNIOSKI

Maksymalne naprężenia ściskające wytworzone wskutek kulowania osiągają maksymalną wartość tuż pod powierzchnią części. Stwierdzono, że wartość naprężeń ściskających ukonstruowanych pod wpływem kulowania wzrasta wraz ze wzrostem liczby uderzeń kulek (stopniem pokrycia powierzchni). Niezbędne są badania eksperymentalne wpływu stopnia pokrycia powierzchni w procesie kulowania na trwałość obrabianych części. Symulacje komputerowe stanowią początkowy etap w poprawnym projektowaniu procesu technologicznego części maszyn.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. Warszawa, WNT 1987.
- [2] Kleiber M.: *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*. Materiały dla studiów doktoranckich i podyplomowych nr 9, Poznań, Politechnika Poznańska 1984.
- [3] Bathe K.J., Wilson E.L.: *Numerical methods in finite Elements Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1976.
- [4] Nakonieczny A.: *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna. Kulowanie. Shot Peening*. Instytut mechaniki Precyzyjnej. Warszawa, 2002