

Wpływ parametrów technologicznych procesu kulowania śrutem twardym na poziom naprężeń własnych

Influence of technological parameters of shot peening sharps hard to own stress level

SEBASTIAN KAMIŃSKI
MATEUSZ KOWALSKI
ROBERT OWSIŃSKI
TADEUSZ ŁAGODA *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.503

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej stanu naprężeń w materiale po procesie kulowania. Model obliczeniowy umożliwia symulację zjawisk zachodzących w głąb materiału w skutek odkształcenia plastycznego. Celem pracy jest przedstawienie możliwości kreowania właściwości materiału oraz jego warstwy wierzchniej po procesie.

SŁOWA KLUCZE: model numeryczny, kulowanie, proces, naprężenia własne

This paper presents the results of numerical analysis of stresses in the material after shot peening process. The calculation model allows the simulation of phenomena into the material as a result of plastic deformation. The aim of the study is to present the possibility of creating material properties and the surface layer of the process.

KEYWORDS: numerical model, shoot peening process, residual stress

Istotnym problemem we współczesnych technologiach wytwarzania jest zagadnienie poprawy jakości powierzchni technologicznej elementu przy jednoczesnej minimalizacji kosztów wytwarzania. Polepszenie walorów użytkowych może zostać uzyskane za pomocą znanych i powszechnie stosowanych metod obróbkowych. Jednym z procesów, który znalazł szerokie zastosowanie w przemyśle, jest kulowanie śrutem twardym rozproszonym. Głównym celem takiej obróbki jest wzmocnienie warstwy wierzchniej elementów narażonych na działanie obciążeń zmiennych oraz na ścieranie (wały, korbowody, osie, koła zębate) [1–4]. W zależności od siły i charakteru, z jakim narzędzie nagniatające oddziałuje na powierzchnię materiału, proces podzielono na dwa rodzaje nagniatania statyczne i dynamiczne. W procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego elementy robocze (śrut) nie są prowadzone w narzędziu w sposób określony i uporządkowany. Medium umacniające (kulka), zderzając się z powierzchnią obrabianego materiału, przekazuje mu swoją energię kinetyczną. Powoduje to powstawanie w warstwie wierzchniej materiału naprężeń ściskających. Wynikiem procesu nagniatania jest wprowadzenie ściskających naprężeń własnych [5–7].

Rezultat przeprowadzonej obróbki zależy od parametrów technologicznych, do których można zaliczyć między innymi: kształt i wymiary stosowanego śrutu oraz intensywność procesu (ciśnienie robocze, czas kulowania).

W pracy zostały zaprezentowane wyniki pomiarów naprężeń własnych wykonanych dla próbek po procesie śrutowania o różnych stopniach intensywności. Wyniki badań eksperymentalnych odniesiono do rezultatów uzyskanych w numerycznej symulacji procesu nagniatania. Jedną z możliwości analizy rozkładu oraz wartości naprężeń wywołanych odkształceniem są metody numeryczne [8]. W swojej pracy Byczkowska, Sawicki, Stegłiński [9] poddają wnikliwej analizie rodzaj dobranego śrutu oraz jego wpływ na właściwości technologiczne warstwy wierzchniej materiału. Dobór właściwych parametrów śrutu wymagałby dużej liczby prób badawczych. Wykorzystanie symulacji komputerowych do określenia parametrów procesu obróbki plastycznej przyczynia się do ograniczenia zbędnej liczby eksperymentów. W prezentowanej pracy analizowano numerycznie proces kulowania próbek aluminiowych za pomocą śrutu o różnej wielkości, wykonanego z różnych materiałów. Dobór właściwych parametrów śrutu wymagałby dużej liczby prób badawczych. Wykorzystanie symulacji komputerowych do określenia parametrów procesu obróbki plastycznej przyczynia się do ograniczenia zbędnej liczby eksperymentów. W efekcie pozwala to na zmniejszenie kosztów produkcji wraz z poprawą właściwości wytrzymałościowych elementów [8, 9].

Materiały

Do badań eksperymentalnych użyto próbek wykonanych ze stali S235JRG2, S355J2+N, są to stale węglowe o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, spawalne, odznaczające się wartością wymaganej minimalnej granicy plastyczności R_e zbliżoną do 235 oraz 355 MPa. Przygotowane materiały badawcze zostały poddane obróbce śrutowania śrutem twardym kulistym. Właściwości wytrzymałościowe badanych wyrobów hutniczych przedstawiono w tablicy.

TABLICA. Właściwości wytrzymałościowe statyczne badanych stali

Stal	R_e , MPa	R_m , MPa	A, %	R_e/R_m
S235	291	424,5	30	0,69
S355	391	516	33	0,76

* Mgr inż. Sebastian Kamiński (s.kaminski@po.opole.pl), dr inż. Mateusz Kowalski (m.kowalski@po.opole.pl), mgr inż. Robert Owsiniński (r.owsinski@po.opole.pl), prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda (t.lagoda@po.opole.pl) – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny

Symulacja procesu kulowania

Zadaniem modelu obliczeniowego jest symulacja umocnienia powierzchniowego uzyskanego za sprawą odkształcenia plastycznego. Próbkę materiału obrabianego oraz śrut zostały zamodelowane jako materiały o tych samych właściwościach mechanicznych (model sprężysto-plastyczny). W obliczeniach zostały uwzględnione parametry technologiczne, takie jak średnica śrutu $d = 3$ mm oraz prędkość początkowa v wynosząca 70 m/s, jest to wartość przybliżona dla układu zasilanego ciśnieniem roboczym 12 bar. Odległość wstępna śrutu i powierzchni obrabianej wynosiła 3 mm. Element poddawany obróbce został zamodelowany jako krążek o średnicy 9 mm, natomiast siatkę elementów skończonych podzielono na strefy o różnych maksymalnych wielkościach elementów skończonych. Do weryfikacji modelu wykorzystano element tetraedryczne nieliniowe. Współczynnik tarcia pomiędzy materiałami wynosił 0,3. Łączny czas symulacji zderzenia wynosił 0,001 s. Wyniki uzyskane na drodze obliczeń numerycznych posłużyły do wyznaczenia naprężeń własnych, które porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

Wartości naprężeń własnych (w kierunkach głównych) obecnych w materiale po zderzeniu śrutu z powierzchnią próbki wynosiły $\sigma_1 = -321$ MPa i $\sigma_2 = -302$ MPa. Pomiar naprężeń własnych wykonano metodą trepanacyjną zgodnie z zaleceniami producenta z wykorzystaniem rozet tensometrycznych. Pomiary wykonywano dla próbek poddanych dwu i trzykrotnego kulowania. Producent zastosowanych rozet tensometrycznych (TML) w dokumentacji technicznej zaleca stosowanie przedstawionej poniżej procedury obliczania naprężeń własnych. Przy zastosowanej średnicy wiertła 1,5 mm obliczenia przeprowadzono dla odkształceń zmierzonych w trzech kierunkach (A, B, C), dla głębokości otworu $h = 2,0$ mm. Przy założeniu jednorodnego stanu naprężeń własnych stosuje się następujące kroki obliczeniowe:

$$\theta = \frac{1}{2} a \tan \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b}{\varepsilon_c - \varepsilon_a} - \frac{n\pi}{2} \quad (1)$$

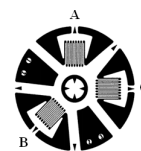
gdzie: θ to kąt określający położenie maksymalnego naprężenia głównego, mierzony zgodnie z ruchem zegara, od kierunku A do σ_1 ; ε_a , ε_b , ε_c to, odkształcenia zmierzone odpowiednio w kierunku A, B i C; $n = 0$ dla $\varepsilon_a > \varepsilon_c$, $n = 1$ dla $\varepsilon_a < \varepsilon_c$.

$$\sigma_1 = \frac{\hat{a}_a + \hat{a}_c}{4A} + \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B \cos(2\theta)}, \sigma_2 = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4A} - \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{4B \cos(2\theta)} \quad (2)$$

gdzie σ_1 , σ_2 to naprężenia główne ($\sigma_1 > \sigma_2$); A i B to współczynniki obliczane z następujących zależności:

$$A = -\frac{(1+\nu)d^2}{8ER^2}, B = -\frac{d^2}{2ER^2} + \frac{3(1+\nu)d^4}{32ER^4}, \quad (3)$$

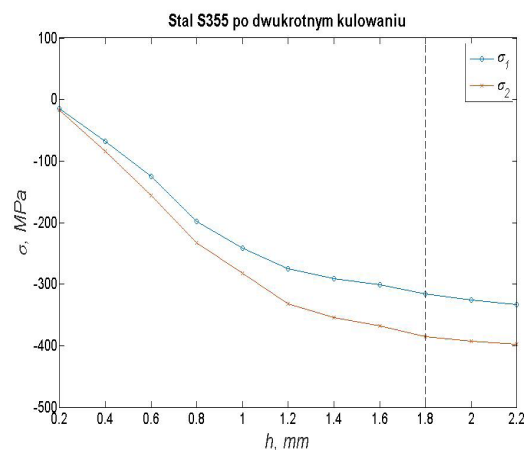
gdzie: E to moduł sprężystości wzdłużnej, ν to liczba Poissona ($\nu = 0,31$); d to średnica otworu ($d = 1,5$ mm); R to promień rozstawienia tensometrów ($R = 5,14/2$ mm). Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Kierunki pomiaru odkształceń rozetami tensometrycznymi firmy TML

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz wysunięto następujące wnioski: Proces kulowania z użyciem śrutu kulistego wprowadza do materiału naprężenia ściskające które, mają bezpośredni wpływ na trwałość zmęczeniową. Na wielkość naprężeń własnych ma wpływ krotkość prowadzenia procesu kulowania. W przypadku stali S355 wartości naprężeń własnych po trzykrotnej obróbce kulowania śrutem kulistym twardym wynosiła około 400 MPa, natomiast w przypadku stali S235 320 MPa. Wartości naprężeń własnych obliczonych na podstawie analizy numerycznej są w porównaniu do uzyskanych wyników eksperymentalnych o około 30% niższe, co jest wartością satysfakcjonującą.



Rys. 2. Rozkład naprężeń (eksperymentalnych) dla stali 355 po dwukrotnym kulowaniu

LITERATURA

- Kluger K., Łagoda T. „Wpływ wartości średniej obciążenia na trwałość zmęczeniową w opisie energetycznym”. *Wielosiowe Zmęczenie Losowe elementów Maszyn i Konstrukcji – część XI Studia i Monografie*, z. 203, Politechnika Opolska 2007.
- Ferjutz K., Davis J.R. “ASM Handbook”. Volume 6: *Welding, Brazing, and Soldering*, 10th ed., ASM International, 1993.
- Kirby R.S. “*Engineering in History*”. Reprint edition, Dover Publications, New York, 1990.
- Semiatin S.L. “ASM Handbook”. Volume 14B: *Metal Working: Sheet Forming*, ASM International, 2006.
- Totten G.E., Funatani K., Xie L. “*Handbook of Metallurgical Process Design*”. CRC Press, 2004.
- Totten G.E., Howes M.A.H., Inoue T. “*Handbook of residual stress and deformation of steel*”. ASM International, Materials Park, OH, 2002.
- Dzierwa A. „Wpływ nagniatania dynamicznego na wybrane właściwości elementów z powłokami chromowymi”. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska 2007.
- Arasiewicz A., Piekarski R. „Pomiar naprężeń własnych metodą usuwania warstw w technologicznych warstwach wierzchnich”. *Postępy Nauki i Techniki*. Nr 6 (2011): s. 5–12.
- Stęgliński M., Byczkowska P., Sawicki J. „Analiza numeryczna stanu naprężeń własnych stopu Al.-Mg.-Mn.-Sc.-Zr poddanego umocnieniu powierzchniowemu poprzez kulowanie”. *Biuletyn WAT*. T. LXIV, nr 1, 2015.