



## Analiza numeryczna stanu naprężeń własnych stopu Al-Mg-Mn-Sc-Zr poddanego umocnieniu powierzchniowemu poprzez kulowanie

MARIUSZ STEGLIŃSKI<sup>1</sup>, PAULINA BYCZKOWSKA<sup>2</sup>, JACEK SAWICKI<sup>2</sup>

Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Inżynierii Materiałowej,

<sup>1</sup>Zakład Tworzyw Metalowych, Kompozytów i Ceramiki,

<sup>2</sup>Zakład Metod Numerycznych w Nauce o Materiałach,

90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15, mariusz.steglinski@p.lodz.pl,

paulina.byczkowska@dokt.p.lodz.pl, jacek.sawicki@p.lodz.pl

**Streszczenie.** W niniejszej pracy zaprezentowane zostały wyniki analizy stanu naprężeń własnych w stopie Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4% po procesie kulowania z wykorzystaniem solwera ANSYA LS-Dyna. Model obliczeniowy umożliwił symulację zjawisk zachodzących na skutek odkształcenia plastycznego wywołanego uderzeniem stalowej kulki o powierzchnię analizowanego stopu aluminium. Analizie poddano dwa zmienne parametry wejściowe: średnicę oraz prędkość kulki. Parametryzacja warunków brzegowych potwierdziła zależność rozkładu naprężeń ściskających w funkcji średnicy oraz prędkości kulki. Celem pracy było przedstawienie możliwości kreowania właściwości warstwy wierzchniej w aspekcie wartości i rozkładu naprężeń własnych. Wybrane wyniki analizy numerycznej zostały porównane z wynikami eksperymentalnymi. Różnica w wynikach pomiędzy symulacją a eksperymentem wynosi średnio 19,7%.

**Słowa kluczowe:** inżynieria materiałowa, analiza numeryczna, obróbka plastyczna, kulowanie, stop aluminium

DOI: 10.5604/12345865.1145490

### 1. Wstęp

Korzystny stosunek masy do wytrzymałości sprawia, że stopy aluminium stanowią coraz szerszą grupę materiałów wykorzystywanych do budowy maszyn i urządzeń. Wysublimowany skład chemiczny stopu Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4%

umożliwia stosowanie technik umocnienia na drodze utwardzenia wydzieleniowego i/lub odkształcenia plastycznego. Jedną z metod umacniania dynamicznego na drodze obróbki plastycznej jest nagniatanie udarowe — kulowanie (ang. *shot peening*). Trwałe odkształcenie plastyczne w wyniku procesu kulowania następuje na skutek uderzenia medium obróbczego (m.in. śrutu stalowego, kulek łożyskowych lub szklanych) o powierzchnię obrabianego materiału [1, 2]. Konsekwencją wprowadzonych odkształceń plastycznych jest zamiana naprężeń rozciągających na ściskające, co prowadzi do zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej i odporności na zużycie poprzez tarcie obrobionych części maszyn i urządzeń [3, 4]. Wartość naprężeń, ich rozkład oraz zasięg jest zależnością między innymi takich parametrów procesu jak: średnica, prędkość kulki, kąt natarcia oraz odległość dyszy roboczej kulownicy od próbki. Uzyskanie maksymalnego umocnienia wymaga odpowiedniego doboru każdego z ww. parametrów procesu oraz określenia wpływu na właściwości wytrzymałościowe stopu.

Możliwością bezpośredniego selektywnego doboru parametrów oraz ich wzajemnej korelacji są badania eksperymentalne, jednak są one czasochłonne oraz kosztowne [5, 6]. Obecnie symulacje komputerowe umożliwiają pośredni dobór parametrów oraz analizę ich wzajemnego oddziaływania. M. Szyć i współautorzy [7, 8] wykorzystali symulacje numeryczne do analizy zjawisk fizycznych występujących przy kulowaniu zęba sprężynowego kultywatora. Dzięki zastosowaniu technik numerycznych badacze przewidywali właściwości mechaniczne obrabianej warstwy wierzchniej, co pozwoliło na optymalizację całego procesu. Symulacje numeryczne procesu kulowania prowadzili również R. Patyk i A. Kułakowska [9], z ich badań wynikało, że wartość naprężeń ściskających jest proporcjonalna do liczby uderzeń. W ramach symulacji procesu kulowania zespół W. Jianming [10] analizował tematykę związaną z relacjami zachodzącymi pomiędzy naprężeniami ściskającymi, wielokrotnością uderzeń śrutu o obrabianą powierzchnię, rozkładem uderzeń na badanym obszarze oraz prędkością dolotową śrutu. W wyniku symulacji stwierdzono, że dzięki wyższej prędkości możliwa jest poprawa rozkładu naprężeń własnych, co korzystnie wpływa na zwiększenie odporności zmęczeniowej pracujących elementów. Zauważono również zmniejszenie efektywności obróbki w wyniku zderzeń śrutu między sobą, co powoduje spadek jego prędkości, a więc maksymalna efektywność energii może być uzyskana przez właściwy dobór prędkości. Kolejnym przykładem wykorzystania analizy numerycznej w modelowaniu procesu kulowania są badania S.A. Meguid i współautorów [11]. Badacze stwierdzają, że wielokrotne uderzenia śrutu w obrabianą powierzchnię skutkują bardziej ujednoczonym rozkładem naprężeń ściskających w porównaniu do pojedynczych czy dwukrotnych uderzeń śrutu. Znaczący wpływ na rozkład naprężeń ściskających ma również większa liczba uderzeń przypadająca na badaną powierzchnię. W ramach symulacji odkryto znaczący wpływ prędkości śrutu. Stuprocentowy wzrost prędkości (z 50 m/s do 100 m/s) skutkuje 150% wzrostem odkształcenia plastycznego i 50% zwiększeniem

głębokości utwardzonej warstwy. Analizą numeryczną potwierdzono, że wpływ prędkości śrutu na wielkość maksymalnych naprężeń ściskających jest znaczący tylko dla niskiej prędkości uderzeń (do 25 m/s).

W niniejszej pracy przeprowadzono numeryczną parametryzację procesu kulowania stopu Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4%, który ze względu na lepsze właściwości wytrzymałościowe w stosunku do obecnie używanych stopów na bazie aluminium, coraz częściej je zastępuje. Celem badań było wykazanie możliwości kreowania warstwy wierzchniej pod względem wartości naprężeń ściskających oraz ich rozkładu, co wiąże się z podwyższeniem właściwości użytkowych stopu Al-Mg-Mn-Sc-Zr. Analiza numeryczna przeprowadzona została w funkcji średnicy oraz prędkości kulki. Wybrane wyniki analizy numerycznej zostały zweryfikowane eksperymentalnie.

## 2. Definicja modelu numerycznego

Model dyskretny opracowany został w oparciu o oprogramowanie ANSYS®. Wykorzystując symulację numeryczną, analizowano umocnienie powierzchniowe na drodze odkształcenia plastycznego. Geometria modelu (rys. 1) przewidywała odległość kulki od powierzchni  $h = 70$  mm oraz zmianę jej średnicy w zakresie kulki  $d = 2,3 \div 3,3$  mm.

Warunki brzegowe modelu numerycznego zakładały zmienne wartości prędkości kulki (tab. 1) w kierunku prostopadłym do powierzchni w przedziale  $v = 30 \div 80$  m/s oraz stałe utwierdzenie podłoża.

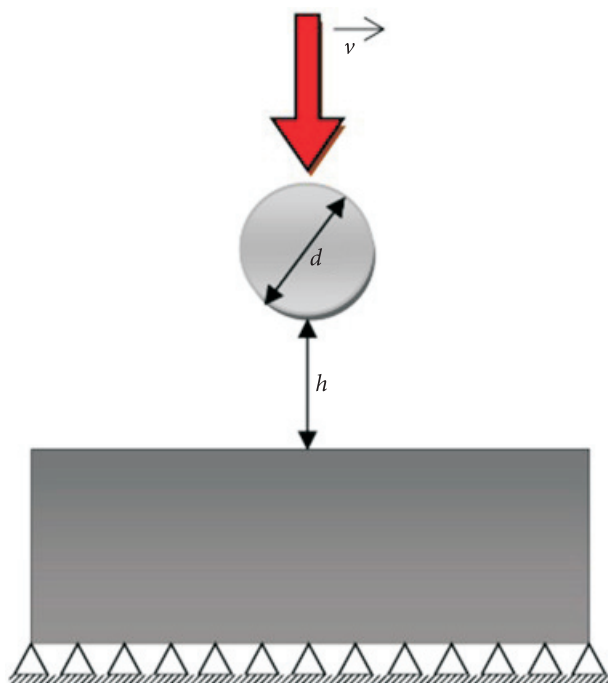
TABELA 1  
Przykładowe przyjęte wartości prędkości początkowej dla zadanych wartości ciśnienia

Ciśnienie [MPa]	Prędkość początkowa [m/s]
0,4	50
0,6	70
0,8	90

Materiał próbki zdefiniowano jako sprężysto-plastyczny. Przyjęte właściwości mechaniczne umacnianego stopu Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4% zostały wyznaczone w oparciu o badania eksperymentalne [12] (tab. 2).

TABELA 2  
Właściwości wytrzymałościowe stopu Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4%

$R_m$ [MPa]	$R_e$ [MPa]	Moduł Younga [GPa]	Współczynnik Poissona
380	420	62	0,33



Rys. 1. Schemat geometryczny analizowanego procesu

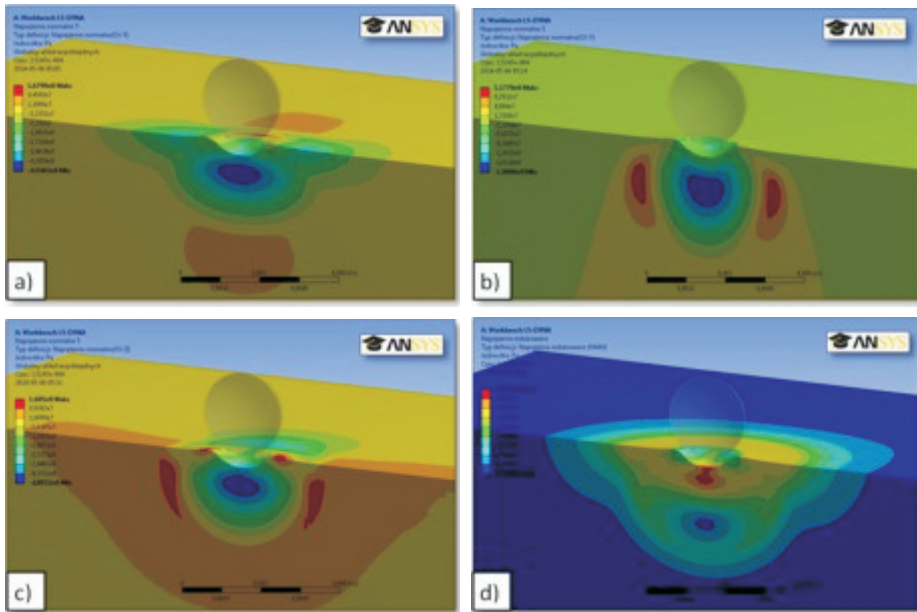
Do dyskretyzacji modelu próbki wykorzystano ośmiowęzłowe elementy czworokątne. Model dyskretny składał się z 140 625 elementów (150 176 węzłów) o wielkości 0,05 mm. Materiał kulki zdefiniowano jako nieodkształcalny i dyskretyzowano go elementami trójkątnymi trzywęzłowymi. Model dyskretny kuli składał się z 3144 elementów oraz z 720 węzłów. Powierzchnia kuli została zamodelowana jako materiał o zerowym parametrze chropowatości oraz o współczynniku tarcia wynoszącym 0,1, który został zdefiniowany celem szczegółowego określenia warunków brzegowych, a dokładnie akumulacji energii odkształcenia.

Obliczenia przeprowadzono w oparciu o solver ANSYS® LS-Dyna. Model obliczeniowy zakładał automatyczne skalowanie kroku czasowego do  $0,1 \cdot 10^{-6}$  s przy całkowitym czasie analizy wynoszącym  $6,0 \cdot 10^{-3}$  s.

Analiza wyników prowadzona była pod kątem uwidocznienia rozkładu naprężeń normalnych powstałych na skutek uderzenia kulki o powierzchnię oraz określenia wielkości i głębokości zalegania maksymalnych naprężeń ściskających w zależności od parametrów procesu. Dodatkowo wykonano parametryzację warunków brzegowych w celu określenia ich korelacji z maksymalnymi naprężeniami ściskającymi w stopie Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4%.

### 3. Analiza stanu naprężeń numerycznych

Na rysunku 2 przedstawiono uzyskane wyniki symulacji pojedynczego uderzenia śrutu w postaci kulki o średnicy  $\phi = 0,7$  mm i prędkości  $v = 80$  m/s w powierzchnię obrabianego materiału.

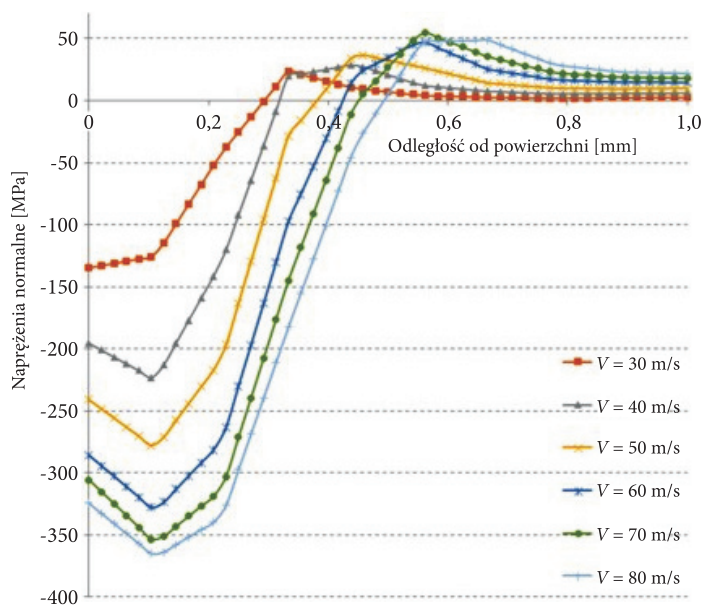


Rys. 2. Rozkład wartości naprężeń normalnych: a) wzdłuż osi X; b) wzdłuż osi Y; c) wzdłuż osi Z oraz d) naprężenia redukowane Hubera-Misesa

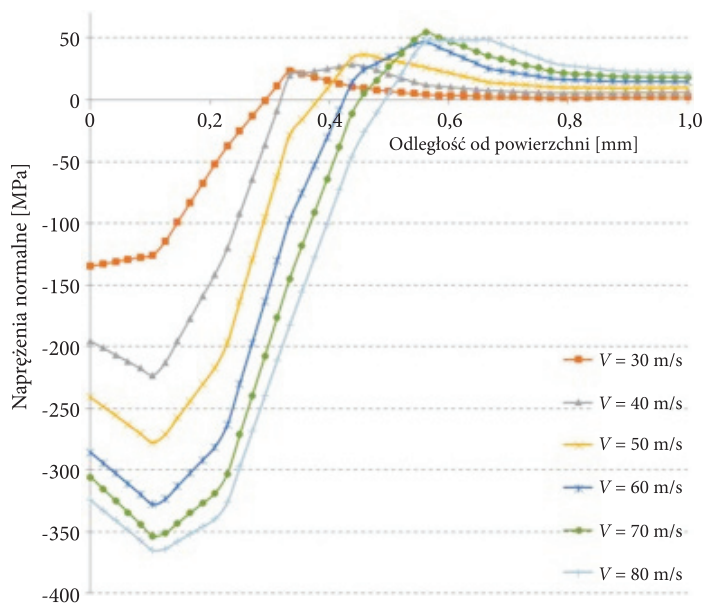
Na rysunkach 3-5 przedstawiono uzyskane z analizy numerycznej rozkład i wartości naprężeń dla różnych średnic śrutu w funkcji zmiennej wartości prędkości śrutu.

Z rozkładu wartości naprężeń w funkcji odległości od powierzchni dla średnicy kulki  $\phi = 0,2$  mm (rys. 3) wynika, że wraz ze wzrostem prędkości zaobserwować można wzrost wartości naprężeń. Podobna zależność zauważalna jest również dla kulki o średnicy  $\phi = 0,4$  mm (rys. 4) i  $\phi = 0,7$  mm (rys. 5). Dla kulki o średnicy  $\phi = 0,2$  mm (rys. 3) maksymalne wartości naprężeń ściskających występują na powierzchni próbki i wynoszą od  $-86$  MPa do  $-355$  MPa (w zależności od prędkości śrutu). Dla prędkości kulki powyżej 40 m/s zauważalna jest również niewielka zmiana charakteru rozkładu naprężeń ściskających, która występuje na głębokości około 0,1 mm.

W przypadku rozkładu naprężeń dla śrutu  $\phi = 0,4$  mm (rys. 4) maksymalna wartość naprężeń występuje pod powierzchnią na głębokości około 0,1 mm i oscyluje



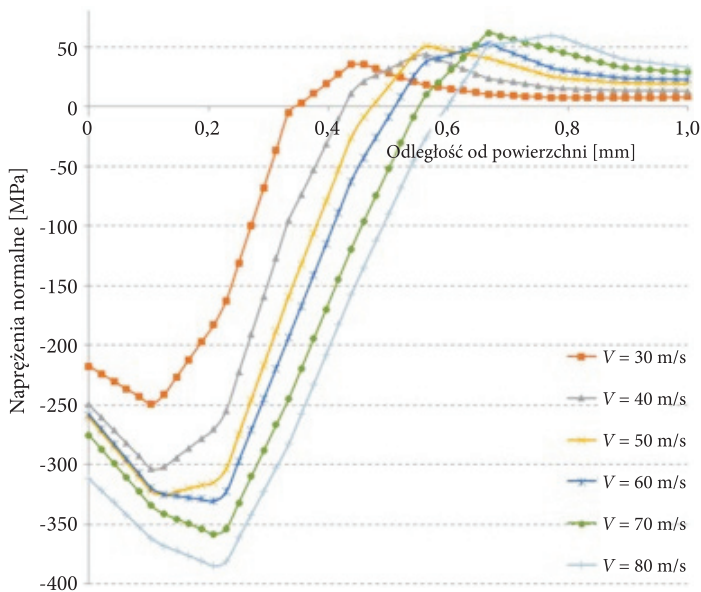
Rys. 3. Rozkład naprężeń dla kulki  $\phi = 0,2$  mm, w funkcji odległości od powierzchni dla zmiennych wartości prędkości  $v = 30 \div 80$  m/s



Rys. 4. Rozkład wartości naprężeń dla kulki  $\phi = 0,4$  mm, w funkcji odległości od powierzchni dla zmiennych wartości prędkości  $v = 30 \div 80$  m/s

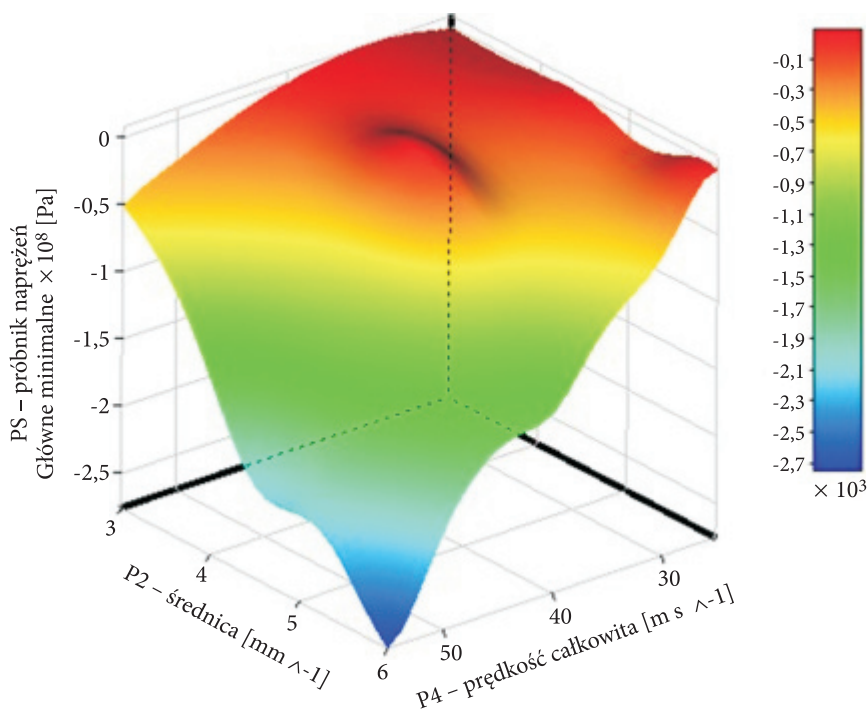
w granicach od  $-223$  MPa do  $-364$  MPa (w zależności od prędkości śrutu) poza prędkością  $v = 30$  m/s, dla której wartość maksymalna naprężeń ( $-134$  MPa) występuje na powierzchni próbki.

W przypadku śrutu o średnicy  $\phi = 0,7$  mm (rys. 5) wartości naprężeń ściskających wynoszą od  $-249$  MPa do  $-384$  MPa (w zależności od prędkości śrutu). W zakresie prędkości  $v = 30 \div 50$  m/s maksymalna wartość naprężeń (od  $-249$  MPa do  $-325$  MPa) występuje na głębokości około  $0,1$  mm. Po przekroczeniu prędkości  $v = 50$  m/s następuje przesunięcie maksymalnej wartości naprężeń ściskających do  $-384$  MPa (dla  $v = 80$  m/s) na głębokość około  $0,2$  mm.



Rys. 5. Rozkład wartości naprężeń dla kulki  $\phi = 0,7$  mm w funkcji odległości od powierzchni dla zmiennych wartości prędkości  $v = 30 \div 80$  m/s

Ostatnim etapem była numeryczna parametryzacja przyjętych warunków brzegowych, pozwalająca wyznaczyć zależność wartości naprężeń nominalnych w funkcji średnicy śrutu i jego prędkości (rys. 6). Parametryzację przeprowadzono w odniesieniu do maksymalnej wartości naprężeń nominalnych występujących w punkcie Bielajewa. Przedstawiona korelacja pozwala szybko przeanalizować wpływ parametrów procesu kulowania na wartość uzyskiwanych naprężeń i tym samym ich przewidywania.



Rys. 6. Korelacja średnicy kulki oraz prędkości całkowitej w stosunku do wartości naprężeń normalnych w punkcie Bielajewa

#### 4. Weryfikacja eksperymentalna

Wybrane punkty analizy numerycznej o zadanych parametrach zostały zweryfikowane z wynikami eksperymentalnymi. Wyniki eksperymentalne uzyskano po przeprowadzeniu procesu kulowania na stanowisku badawczym umożliwiającym zmianę ciśnienia roboczego i wielkości śrutu [12]. Wartość naprężeń ściskających w próbkach wyznaczono metodą rentgenowską przy użyciu dyfraktometru PROTO iXRD. Badania naprężeń własnych przeprowadzono, wykorzystując lampę Cr, promieniowanie  $K\alpha_1$  o napięciu lampy 20 kV i prądzie lampy 4 mA oraz kącie Bragga  $156,31^\circ$  (refleksy od rodziny płaszczyzn 222). Zastosowano oscylację względem kąta beta równą  $3^\circ$ , korekcję LPA, aperturę 2 mm oraz filtr wanadowy. Położenie uzyskanych pików dyfrakcyjnych przybliżano funkcją Cauchy'ego, przyjmując 100% wysokości pików. Stałe sprężyste przyjęte według bazy danych aplikacji komputerowej wynosiły:  $(1/2)S_2 = 18,56e-6$  [1/MPa] oraz  $-S_1 = 4,79e-6$  [1/MPa]. Otrzymane wyniki pomiaru przedstawiono w tabeli 3.

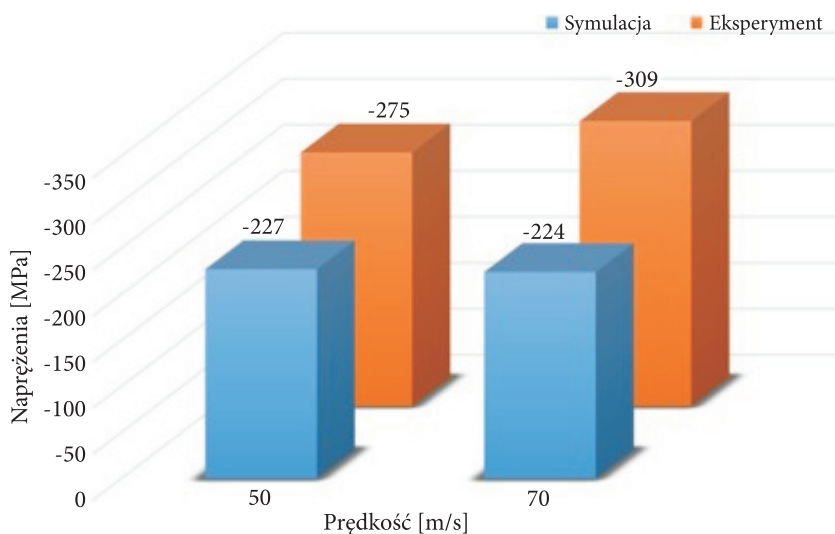


TABELA 3

Naprężenia własne powstałe po procesie śrutowania

Rodzaj śrutu	Prędkość [m/s]	Naprężenia własne [MPa]
S230	50	-227
	70	-224
	90	-232

Wyniki modelowania i eksperymentu wykazują zbieżność, co pozwala przypuszczać, że opracowana metoda badań będzie mogła być stosowana do analizy procesu kulowania stopu Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4% bez konieczności wykonywania kosztownych badań doświadczalnych. Różnica w wynikach pomiędzy symulacją a eksperymentem wynosi średnio 19,7%.



Rys. 7. Porównanie naprężeń własnych wyznaczonych eksperymentalnie i numerycznie dla śrutu  $\phi = 0,7$  mm

## 5. Podsumowanie i wnioski

Analiza zjawisk fizycznych przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS®LS-Dyna oraz badań eksperymentalnych zachodzących podczas kontaktu kulka — próbka pozwoliła na dobór optymalnych parametrów procesu wynoszących odpowiednio: średnica śrutu  $\phi = 0,4$  mm oraz prędkość śrutu 50 m/s, przy których uzyskiwana jest zakładana wartość naprężeń ściskających wynosząca ok. -250 MPa oraz ich zasięg ok. 0,3 mm w badanym materiale.

Parametryzacja wyników pod kątem ściskających naprężeń normalnych umożliwia wyodrębnienie przedziałów dla poszczególnych parametrów, tj.: średnicy śrutu  $\phi = 0,4 \div 0,7$  mm oraz prędkości 40-50 m/s, w których wzajemna ich korelacja powoduje uzyskanie korzystnej wartości naprężeń normalnych oscylującej w granicach  $-200 \div -250$  MPa oraz ich zasięgu wynoszącego ok. 0,3 mm.

Badania numeryczne stopu Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4% wykazały możliwość kreowania warstwy wierzchniej pod względem wartości naprężeń ściskających oraz ich odległości od powierzchni.

Z rozkładu wartości naprężeń w funkcji odległości od powierzchni dla średnicy kulki  $\phi = 0,2$  mm,  $\phi = 0,4$  mm i  $\phi = 0,7$  mm wynika, że wraz ze wzrostem prędkości zaobserwować można wzrost wartości naprężeń.

Analiza komputerowa dla określonych warunków brzegowych oraz ustawień solwera obliczeń umożliwia ograniczenie badań eksperymentalnych. Różnica w wynikach pomiędzy symulacją a eksperymentem wynosi średnio 19,7%.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer: DEC-2012/07/N/ST8/03099.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XIII Konferencji TKI (Techniki Komputerowe w Inżynierii) 2014, Licheń Stary, 6-9.05.2014 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 17.07.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 28.10.2014 r.

#### LITERATURA

- [1] BURAKOWSKI T., WIERZCHOŃ T., *Inżynieria powierzchni metali*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [2] DZIERWA A., KORZYŃSKI M., *Badania możliwości poprawy przez kulowanie właściwości zmęczeniowych elementów chromowanych*, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 27, 1, 2007.
- [3] FEDORYSZYN A., PIOSIK T., RZADKOSZ S., STASZCZAK L., ZYZAK P., *Efekty obróbki powierzchniowej strumieniem śrutu*, XII Konferencja odlewnicza TECHNICAL, 2010.
- [4] NAKONIECZNY A., *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna — kulowanie*, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa, 2002.
- [5] KACZMAREK Ł., *Lekkie, przeciwzżyciowe materiały funkcjonalne na bazie stopów aluminium*, *Zeszyty Naukowe — Politechnika Łódzka, Rozprawy Naukowe*, Wydanie 1152, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2013.
- [6] KATSUJI T., *Papers on shot peening published in the world for the last thirteen years*, The 7th International Conference on Shot Peening, IMP, Warszawa, 1999.
- [7] SZYC M., KUKIEŁKA L., *Numerical analysis of shot peening on surface in Ansys application*, *Proceeding in Applied Mathematics and Mechanics*, 2008.
- [8] SZYC M., PATYK R., KUKIEŁKA L., *Computer modelling and simulation of the physical phenomena in shot peening proces of cultivator tine*, *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, 55, 1, 2011, 106-109.

- [9] PATYK R., KUŁAKOWSKA A., *Modelowanie procesu kulowania części maszyn*, Logistyka, 6, 2011, 3313-3319.
- [10] JIANMING W., FEIHONG L., FENG Y., GANG Z., *Shot peening simulation based on SPH method*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 56, 2011, 571-578.
- [11] MEGUID S.A., SHAGAL G., STRANART J.C., *3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model*, International Journal of Impact Engineering, 27, 2002, 119-134.
- [12] STEGLIŃSKI M., KACZMAREK Ł., SAWICKI J., GAWROŃSKI Z., JANUSZEWICZ B., STACHURSKI W., *Zmiana właściwości trybologicznych oraz naprężeń własnych stopu 7075 wywołana deformacją plastyczną procesu shot peening*, Inżynieria Materiałowa, 5, 2012.

M. STEGLIŃSKI, P. BYCZKOWSKA, J. SAWICKI

### Numerical analysis of residual stress of Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy subjected to surface strengthening by shot peening

**Abstract.** In this paper, we presented the results of the analysis of the stresses in the Al-Mg5%-Mn1,5%-Sc0,8%-Zr0,4% alloy after shot peening process using solver ANSYS® LS-Dyna. The computational model illustrates the phenomena occurring as a result of plastic deformation caused by hitting a steel ball on the surface of the analyzed aluminium alloy. We analyzed two input variables: diameter and speed of a ball. The resulting normal stress distribution centred exposes the minimum compressive stress at a position located at a depth point of Belyayev 0.125 mm with a value of  $\sigma = -345$  MPa. Variable parameter shows the correlation of the boundary conditions of minimum stress increase with increasing ball's diameter and its speed. Selected points of numerical analysis were verified with experimental results.

**Keywords:** materials science, numerical analysis, metal forming, shot peening, aluminium

