

# Wytrzymałość zmęczeniowa kulowanego stopu magnezu AZ31B-F

inż. Magdalena Karpowicz\*,\*\*, inż. Grzegorz Mońka\*, prof. dr hab. inż. Jerzy Jeleńkowski\*  
\* Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, \*\* Student Wojskowej Akademii Technicznej

W pracy, powierzchnie próbek stopu magnezu do obróbki plastycznej AZ31B-F, poddawano dynamicznej obróbce plastycznej kulkami z węgla wolframu, a następnie wygładzano kształtkami ceramicznymi. Po kulowaniu i po wygładzaniu wykonano pomiary chropowatości i twardości powierzchniowej, rozkłady mikrotwardości w warstwach odkształconych oraz obserwacje strukturalne. Porównywano je następnie z właściwościami w stanie początkowym. Oceny zmian właściwości mechanicznych dokonano głównie na podstawie badań wytrzymałości zmęczeniowej przy obciążeniu wahadłowym, przyjmując za jej miarę umowną granicę wytrzymałości zmęczeniowej przy  $2 \times 10^7$  cykli obciążeń oraz rozkładów naprężeń własnych na płaskich próbkach, wykonane metodą Weismana-Phillipsa.

## 1. Wprowadzenie

Od wielu lat obserwuje się wzrost zainteresowania stopami magnezu do zastosowań w przemyśle samochodowym, sprzęcie gospodarstwa domowego ale również w przemyśle lotniczym. Wynika to przede wszystkim z dążenia do zmniejszenia masy części stosowanych zwłaszcza w środkach transportu. Wadą stopów magnezu jest natomiast ich porowatość, skłonność do gruboziarnistości i mała odporność korozyjna. Istotnymi zaletami są: mały ciężar właściwy, dobra plastyczność i sprężystość, korzystny stosunek wytrzymałości do masy wyrobu, tzw. wytrzymałość właściwa pozwalająca na przenoszenie dużych obciążeń, zdolność do tłumienia drgań oraz bardzo dobra skrawalność i dobra spawalność. Główne zastosowanie w przemyśle samochodowym to: wsporniki drążka kierownicy, pedały, tablice wskaźników, części siedzeń, kierownice, części aparatów zapłonowych, elementy obudowy skrzyni biegów, szkielety drzwi i okien dachowych, obudowy osi przedniej, tylnej i wału silnika, wyposażenie elementów wnętrza czy drzwi odlewane pod ciśnieniem wzmocnione elementami prasowanymi ze stopów aluminium [1].

Wiadomo, że niektóre materiały metalowe po odkształceniach plastycznych spowodowanych zderzeniem się ciał

i tarciami, mogą w warstwach przypowierzchniowych uzyskać unikatową strukturę utrudniającą dalsze rozpręszczenie się odkształcenia plastycznego. W stopach magnezu odkształcenie plastyczne, zgniot, nie zwiększa jednak zauważalnie właściwości mechanicznych ale i nie prowadzi do ujemnego rozkładu właściwości. Większy wkład w umocnienie niż zgniot mają w nich różnice w wymiarach atomów dodatków stopowych tworzących roztwór stały zwiększające wartość modułu ścinania i zmniejszające energię błędu ułożenia (ebu), która utrudnia poślizg poprzeczny i opóźnia procesy pełzania. Z tego powodu do stopów magnezu dodaje się obecnie pierwiastki ziem rzadkich (Ce, La, Pr, Nd), które poza wymienionymi korzyściami rozdrabniają ziarno i zwiększają odporność na korozję.

Kulowanie stopów magnezu generuje dyslokacje z wielu źródeł – początkowo w ziarnach korzystnie zorientowanych w stosunku do działającego obciążenia. Przekraczane każdorazowo w kolejnych cyklach uderzenia kulek, naprężenie granicy plastyczności powoduje, że odkształcenie plastyczne następuje w wielu płaszczyznach poślizgu i we wszystkich ziarnach. Zniszczenie może nastąpić w wyniku poślizgu poprzecznego po utworzeniu dużej ilości progów i wzajemnych przecięć dyslokacji. Ważna jest więc tu rola granic ziaren – barier dla cyklicznego przekazywania



poślizgu. Ujmuje to znana zależność Halla-Petcha wyrażona wzorem:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + kd^{-0,5},$$

gdzie:  $\sigma_{0,2}$  – granica plastyczności,  $\sigma_0, k$  – stałe materiałowe,  $d$  – średni wymiar ziarna.

W stopach magnezu o zróżnicowanych wymiarach ziarna, wartość parametru  $k$  w tym wzorze może istotnie zmieniać się [2].

W stopach magnezu przy odkształcaniu plastycznym, w zakresie od temperatury pokojowej do ok. 200°C, następują deformacje w podstawowym układzie poślizgów oraz bliźniakowanie, które sumarycznie mogą wywołać umocnienie ale i osłabienie materiału [3]. Przy wyższych temperaturach odkształcania aktywizują się dodatkowe systemy poślizgu, a ponadto poślizg poprzeczny i przepętlanie dyslokacji. Zachodzi też bliźniakowanie, które w tym przypadku jest unicestwiane dynamicznym zdrowieniem i dynamiczną rekrytalizacją lub anihilacją świeżo powstałych mikrobliźniaków [3]. W badaniach procesu kulowania w temperaturze ok. 50°C [4], tj. w warunkach jakie mogły istnieć w tej pracy, bliźniakowanie jest dominującym mechanizmem odkształcania. Zatem, gdy kulowanie powoduje nawet nieznaczny wzrost temperatury liczba bliźniaków zmniejsza się i może nastąpić stabilizacja, a nawet pogorszenie właściwości. Stwierdzono, że w takich warunkach odkształcania wykładnik umocnienia  $n$  (we wzorze  $\dot{\epsilon} = \sigma^n$ , gdzie  $\dot{\epsilon}$  jest prędkością odkształcania plastycznego,  $\sigma$  naprężeniem) osiąga maksimum przy temperaturze ok. 100°C, po czym zmniejsza się [4].

Kulowanie, w stopach magnezu daje skutek dodatni, gdy powoduje w warstwie wierzchniej wzrost naprężeń ściskających, pozytywnie wpływa na opóźnienie korozji wżerowej i pęknięcie korozyjne, co jest łatwiej osiągalne w wyższych stopach stopach odlewniczych [5,6]. W pracy [7] Autorzy wykazali negatywny wpływ kulowania stopu magnezu przy temperaturze pokojowej, co może sugerować ograniczenia w stosowaniu tego procesu.

## 2. Badany materiał

Badania przeprowadzono na próbkach ze stopu magnezu AZ31B-F o składzie chemicznym zamieszczonym w tabl. 1. Próbki oznaczono następująco: stan początkowy (wejściowy) (S), po kulowaniu śrutem z węgla wolframu (K), po kulowaniu i wygładzeniu w kształtkach ceramicznych (W).

Tabela 1. Skład chemiczny stopu magnezu AZ31B-F [% mas.]

materiał	Mg	Zn	Mn	Si	Fe	Cr	Al	Ni
AZ31B-F	reszta	2,80	0,53	0,01	0,003	0,24	0,72	0,001

## 3. Metodyka badań

Kulowanie przeprowadzono na stanowisku PEEN-IMP strumieniem kulek z węgla wolframu o średnicy 0,65 mm, pod ciśnieniem powietrza 0,2 MPa w czasie 8 min. Parametry

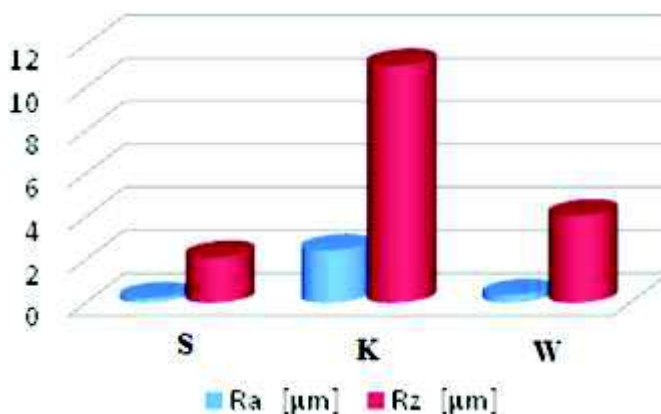
procesu zostały tak dobrane, aby chropowatość powierzchni (Ra) po kulowaniu nie uległa zbyt istotnym zmianom w porównaniu ze stanem wejściowym. Inne parametry kulowania to, m.in.: średnica dyszy 6,4 mm, odległość dysz od powierzchni kulowanej 350 mm. Intensywność kulowania (określana na płytkach Almena) typ NI  $f_N = 0,42$  mm oraz  $Al f_A = 0,22$  mm; pokrycie powierzchni kulowanej  $\geq 98\%$ .

Badania wytrzymałości na rozciąganie, wykonano na hydraulicznej maszynie Instron model 8801 o zakresie siłomierza 100 kN. Badania umownej granicy wytrzymałości zmęczeniowej  $N_G 2 \times 10^7$  przy zginaniu obrotowym, wykonano na maszynie Schenck'a przy częstotliwości zmian obciążenia 100 Hz. Pomiary chropowatości powierzchni próbek w każdym z badanych stanów wykonano na profilografie Mitutoyo SurfTest SJ, długość odcinka pomiarowego 0,8 mm.

Pomiar twardości powierzchniowej i rozkłady mikro-twardości na grubości warstw kulowanych przeprowadzono metodą Vickersa. Strukturę materiału w badanych stanach obrazowano przy użyciu mikroskopu optycznego Zeiss Neophot na zglądach trawionych nitałem przy powiększeniu  $\times 500$ . Rozkłady naprężeń własnych w próbkach wykonano metodą Waismana-Phillipsa z usuwaniem warstw trawieniem chemicznym.

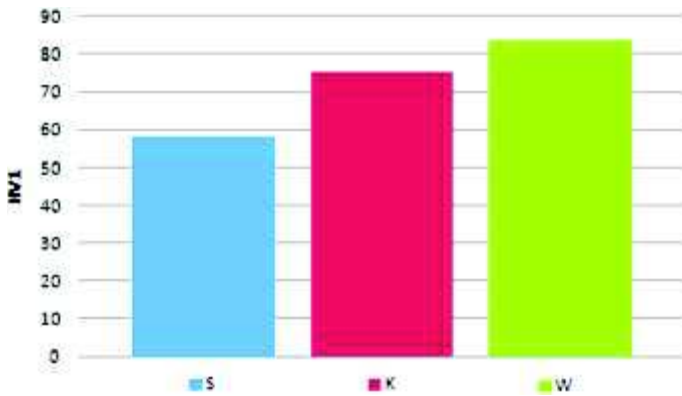
## 4. Wyniki badań i ich interpretacja

Średnie wartości pomiarów chropowatości powierzchni płaskich próbek AZ31B-F w stanie S, K i W wskazały, że kulowanie spowodowało 11-krotny wzrost chropowatości ( $Ra = 2,44 \mu m$ ) w stosunku do stanu początkowego ( $Ra = 0,22 \mu m$ ). Wygładzenie zmniejszyło chropowatość, ale pozostał 6,5-krotny wzrost parametru Ra w stosunku do próbek w stanie początkowym. Rys. 1 ilustruje średnie wartości parametrów chropowatości próbek stopu AZ31B-F w wymienionych stanach. Każdy punkt na wykresie jest średnią z 10 pomiarów.



Rys. 1. Chropowatość próbek stopu AZ31B-F w stanie początkowym (S), po kulowaniu (K) oraz po kulowaniu i wygładzeniu (W)

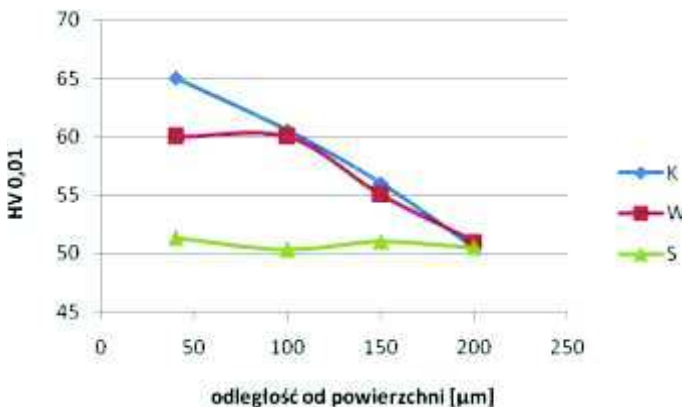
Na rys. 2 zamieszczono wyniki pomiarów twardości. Kulowanie spowodowało wzrost twardości powierzchniowej o około 30%, a dodatkowe wygładzenie – dalszy jej wzrost do około 44%. Każdy punkt na wykresie, jak poprzednio, jest średnią z 10 pomiarów.



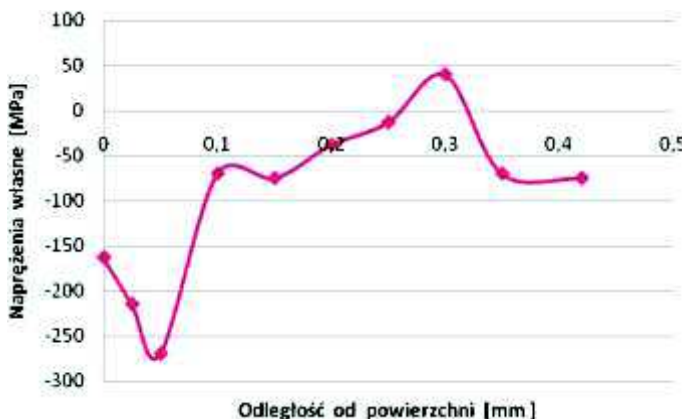
Rys. 2. Wyniki pomiarów twardości próbek ze stopu AZ31B-F w stanach S, K i W

Wykonano również rozkłady mikroktwardości  $HV_{0,01}$  na próbkach kulowanych oraz po kulowaniu i wygładzeniu. Uzyskane wyniki zamieszczono na rys. 3. Z rozkładów mikroktwardości można wnioskować o zasięgu odkształcenia plastycznego, skutku zgniotu do głębokości ok. 200  $\mu\text{m}$  dla obydwóch stanów obróbki: kulowania i kulowania z wygładzaniem. Wygładzanie spowodowało zmniejszenie mikroktwardości w warstwie przypowierzchniowej.

Rozkłady naprężeń własnych w warstwach umocnionych kulowaniem wykonane metodą Weismana-Phillipsa pokazano na rys. 4. Na podstawie obliczeń stwierdzono



Rys. 3. Rozkład mikroktwardości próbek stopu AZ31B-F w stanie wejściowym (S) po kulowaniu (K) oraz po kulowaniu i wygładzeniu (W)



Rys. 4. Średnie wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej po kulowaniu stopu magnezu AZ31B-F

wartości ujemne, co oznacza że naprężenia są naprężeniami ściskającymi. Każdy punkt na rys. 4 jest średnią z 3 pomiarów.

Właściwości otrzymane w próbie rozciągania próbek stopu AZ31B-F: w stanie wejściowym (S), po kulowaniu (K) i po kulowaniu z wygładzeniem kształtkami ceramicznymi (W) zamieszczono w tabeli 2. We wszystkich trzech stanach średnie wartości  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  oraz  $A_5$  nie różnią się znacząco. Dla próbek po kulowaniu i po kulowaniu z dodatkowym wygładzeniem obserwuje się natomiast wzrost średnich wartości modułu sprężystości.

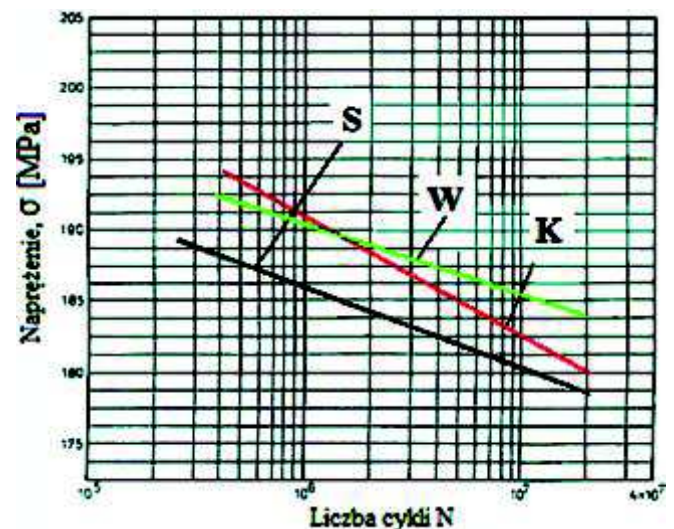
Tabela 2. Właściwości wytrzymałościowe stopu AZ31B-F

Stan próbki	E [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]
S	44113	213,3	261	16,7
K	45480	211,2	266	16,1
W	46840	212,8	267	16,4

### 5. Umowna granica wytrzymałości zmęczeniowej ( $N_e = 2 \times 10^7$ )

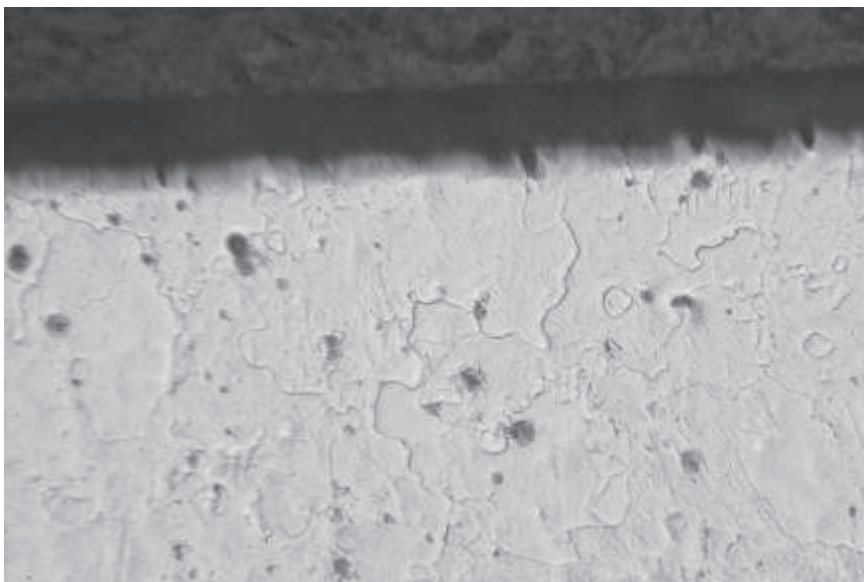
Umowna granica wytrzymałości zmęczeniowej  $N_e$  próbek w stanie początkowym (rys. 5) ma wartość ok. 178 MPa. Kulowanie spowodowało nieznaczne jej zwiększenie – do wartości 180 MPa. Nachylenie prostych na wykresie Wohlera jest pewną ilustracją zmniejszenia stabilności struktury stopu uwarunkowanego zależnością od temperatury, czasu kulowania i wartością w warunkach dużych odkształceń. W podwyższonej temperaturze bardziej niszczące są naprężenia ściskające, w niższej rozciągające. Wytrzymałość zmęczeniowa w zakresie większych odkształceń zwiększa się ze wzrostem plastyczności [1].

Obrazy struktur stopu AZ31B-F w stanie wejściowym (S), po kulowaniu (K) oraz po kulowaniu i wygładzeniu (W) przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8. W strefie kulowanej wzrosła liczba pasm poślizgu i bliźniaków, równoległych do powierzchni próbki lub odwzorowujących zaokrąglenie kulek.

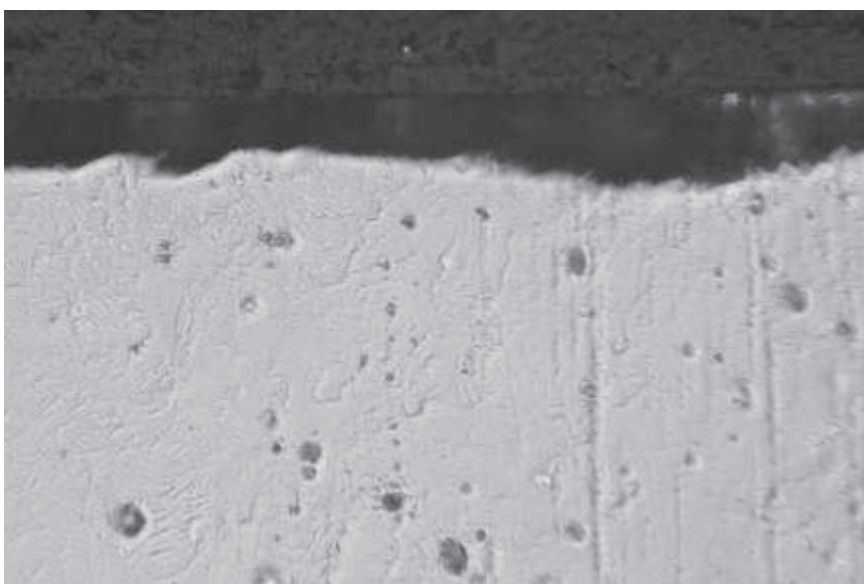


Rys. 5. Wytrzymałość zmęczeniowa stopu AZ31B-F: stan wejściowy (S), po kulowaniu (K), po kulowaniu i wygładzaniu (W)

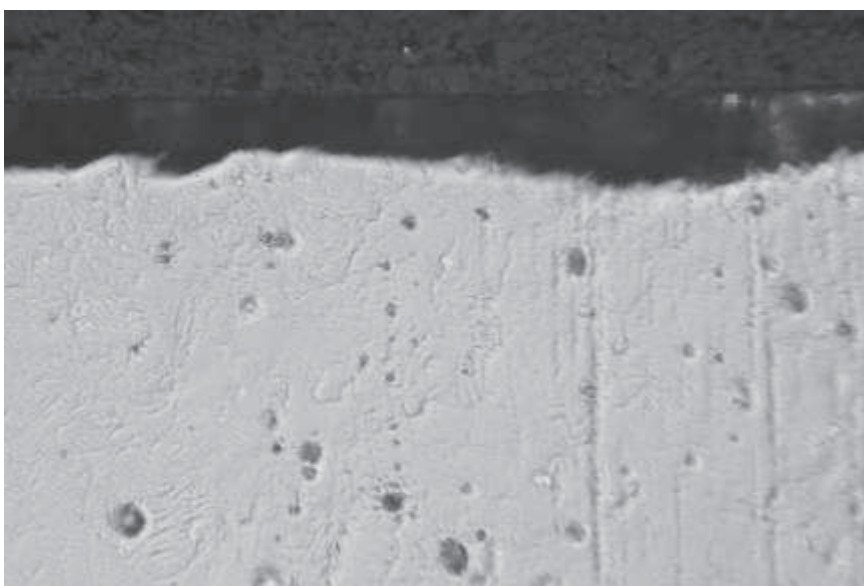




Rys. 6. Struktura stopu magnezu AZ31B-F w stanie wyjściowym (S) – powiększenie 500 ×



Rys. 7. Struktura umocnionej strefy przypowierzchniowej kulowaniem (K) – powiększenie 500 ×



Rys. 8. Struktura po kulowaniu i wygładzaniu (W) – powiększenie 500 ×

Przypowierzchniowe zmiany struktury widoczne są do głębokości około  $150 \div 200$   $\mu\text{m}$ . Podobny obraz struktur wystąpił w stanie (K) i (W) – rys. 7 i 8. Wygładzanie nie spowodowało różnicy w wyglądzie ziaren i głębokości zalegania odkształcenia.

## 6. Podsumowanie i uwagi końcowe

Właściwości wytrzymałościowe stopu magnezu AZ31B-F w stanie początkowym były gorsze od właściwości próbek kulowanych w wariacie (K) i (W). Kulowanie nie wpłynęło istotnie na wytrzymałość zmęczeniową  $N_g$ , która pozostała prawie na tym samym poziomie. Nieznaczny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej – do wartości 185 MPa, zanotowano po wygładzaniu próbek kulowanych. Wykresy zmęczeniowe różniły się kątem nachylenia w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Kulowanie spowodowało 11-krotny wzrost chropowatości (Ra), a wygładzenie powierzchni po kulowaniu zmniejszyło tę cechę do 6,5-krotnego wzrostu.

W wyniku kulowania próbek nastąpił wzrost twardości powierzchniowej  $HV_{0,01}$ , w przedziale  $30 \div 44\%$ . Wykonane rozkłady mikro-twardości na próbkach dla wariantów (K) i (W) wykazują większą twardość do głębokości 0,2 mm, co potwierdzają obserwacje mikroskopowe.

## Literatura

1. Hetmańczyk M. (redakcja): Postępy nauki o materiałach i inżynierii materiałowej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002, s. 231.
2. Martin J.W., Doherty R.D.: Stability of microstructure in metallic system. Cambridge Press, 1977.
3. Jiang L., Jonas J.J., Luo A.A., et al.: Twinning-induced softening in polycrystalline AM30 Mg alloy at moderate temperatures. Scripta Materialia, vol. 54, 2006, pp. 771-775.
4. Yin D.L., Zhang K.F., Wang G.F.: Warm deformation behaviour of hot-rolled AZ31Mg alloy. Mat. Sc, Eng. A 2005, v. 392(1-2), pp. 320-325.
5. Barry S.V., Hainsworth M.E., Fitzpatrick J.J.: Effect of shot peening on the fatigue behaviour of cast magnesium A8N. Materials Science and Engineering, A 507 (2009), 50-57.
6. Guagliano M.: Shot Peening in the Automotive Industry. The importance of the stress gradient. Metal Finishing News, 2013 T. 14 nr 11 pp. 34-34
7. Zhang P.J., Lindemann J.: Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80. Scripta Materialia vol. 52, 2005, pp. 485-490. ■