



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

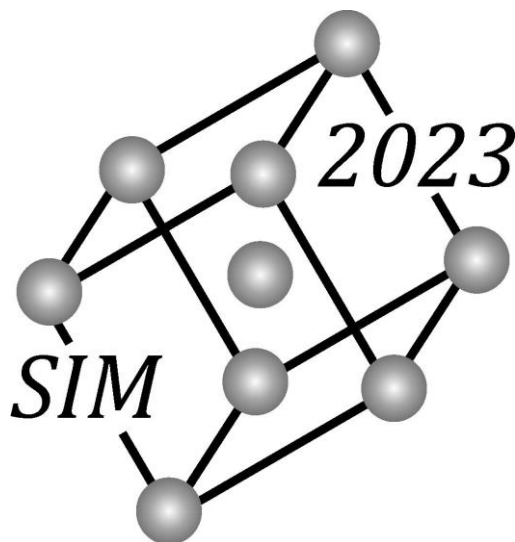
WYDZIAŁ INŻYNIERII METALI I INFORMATYKI PRZEMYSŁOWEJ



50
SZKOŁA INŻYNIERII
MATERIAŁOWEJ

OPIEKUN NAUKOWY KONFERENCJI

Prof. dr hab. inż. Piotr Bała



Kraków, 27 ÷ 29 IX 2023

KOMITET ORGANIZACYJNY

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU

Prof. dr hab. inż. Piotr Bała

CZŁONKOWIE KOMITETU

dr inż. Rafał Dziurka

dr inż. Edyta Rożniata

dr inż. Łukasz Frocisz

dr inż. Krzysztof Pajor

mgr Anna Smyk

ORGANIZACJA KONFERENCJI



PARTNERZY



PATRONAT HONOROWY



Ministerstwo
Edukacji i Nauki

SPONSORZY/PARTNERZY PRZEMYSŁOWI



SPIS TREŚCI

Baluch K., Łyczkowska K., Miara D., Gładys K., Mrowiec A.	7
Odporność na korozję wysokotemperaturową połączeń zgrzewanych metodą FSW ze stopu WE43	
Baluch K., Miara D., Łyczkowska K., Gładys K., Mrowiec A.	8
Struktura złączy FSW stopu magnezu z dodatkiem itru WE43	
Bardo R., Fryzowicz K., Dziurka R., Bała P.	9
Wpływ obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stopów wysokoentropowych, wytworzonych przyrostowo z proszków elementarnych	
Bączek M., Gąsiorkiewicz M.	10
Wybrane aspekty wdrożenia technologii kucia i walcowania pierścieni wielkogabarytowych	
Bednarczyk W., Lewandowska M.	11
Poprawa stabilności termicznej drobnoziarnistych, biodegradowalnych stopów Zn-Li-Mn-Mg-Cu wytwarzanych poprzez szybką krystalizację i skręcanie pod wysokim ciśnieniem	
Błajszczak Ł., Kąc S.	12
Analiza topografii i zwilżalności powierzchni stali 316L po procesie laserowego teksturowania	
Bzowski K., Rauch Ł., Pietrzyk M., Łazarski J., Milenin I.	13
Zintegrowany model cieplno-metalurgiczny procesu chłodzenia gazem pod wysokim ciśnieniem koła zębatego wykonanego z Pyrowear 53	
Chaczyk A., Skoda P., Krawczyk J.	14
Wpływ obróbki cieplno-plastycznej na jakość powierzchni i struktury CuZn21Si3P	
Chrzan K., Kalandyk B., Małysza M., Wilk-Kołodziejczyk D., Grudzień-Rakoczy M.	15
Mikrostruktura oraz własności stopu wysokoentropowego Al _{0.5} CoCu _{0.25} FeNi wytwarzanego drogą topienia indukcyjnego	
Cios G.	16
Postęp techniki EBSD	
Dziurka R., Pasiowiec H., Polkowski W., Dubiel B., Kruk A., Lech S.	17
Własności wytwarzanego przyrostowo stopu Fe-10Ni	
Fryzowicz K., Bardo R., Dziurka R., Bała P.	18
Drukowalność stali narzędziowych – wpływ dodatków stopowych na przykładzie Wanadu	
Hain C., Wieczerzak K., Casari D., Sharma A., Michler J., Hessler-Wyser A., Nelis T.	19
Sterowanie strukturą cienkich powłok azotku cynku-cynki metodą reaktywnego HiPIMS wspomaganą plazmą mikrofalową	
Hamryszczak T., Śleboda T., Korpala G.	20
Analiza parametrów walcowania na gorąco stali mikrostopowych oraz ich wpływ na własności i mikrostrukturę	
Jażdżewski T., Regulski K.	21
Analiza zmian napięcia w procesie obróbki elektroerozyjnej z wykorzystaniem elementów transformacji falkowej	

Każmierski T., Krawczyk J., Frocisz L., Kokosza A., Piątek M.	22
Analiza przyczyn pęknięć tarczy felgi samochodowej wykonanej ze stali DP600	
Kmita A., Dańko R., Holtzer M., Dańko J., Drożyński D., Skrzyński M., Rocznik A., Gruszka D., Jakubski J.	23
Nieorganiczne systemy spoiw: drogą do redukcji emisji w odlewniach	
Kopeć-Surzyn A., Madej M.	24
Badania stopów wysokoentropowych wytwarzanych technologią metalurgii proszków	
Krawczyk J.	25
Analizy strukturalne i eksploatacyjne materiałów metalicznych	
Lachowicz M.M.	26
Inżynieria materiałowa – starsza czy młodsza siostra inżynierii mechanicznej?	
Łukaszewicz N., Hain C., Nelis T.	27
Wytwarzanie i charakterystyka materiałów cienkowarstwowych w zakresie ich zastosowań w chłodzeniu radiacyjnym	
Łyczkowska K., Baluch K., Miara D., Gładys K., Mrowiec A.	28
Wpływ obróbki cieplnej na strukturę i właściwości złączy FSW ze stopu magnezu WE43	
Michta G., Ciesielka M., Mrzyglód B., Smyk A., Śleboda T.	29
Wieloaspektowa aktywizacja uczniów szkół średnich, czyli aktywności WIMiP AGH związane z popularyzacją nauk technicznych	
Mielczarek M., Moskalewicz T.	30
Wpływ przygotowania powierzchni podłoży tytanowych na mikrostrukturę, topografię i właściwości powierzchni powłok TTO/chitozan i Terpinen-4-ol/chitozan osadzanych elektroforetycznie	
Pajor K., Pikulski D., Koziel T.	31
Projektowanie własności mechanicznych masywnych szkieł metalicznych na osnowie Zr	
Pikulski D.A., Pajor K., Koziel T.	32
Wpływ zawartości tlenu na średnicę krytyczną w szklotwórczym stopie $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$	
Piwowarski G., Gracz B., Krajewski W. K.	33
Właściwości tłumiące dwuskładnikowych stopów Al-Zn	
Sikora A., Cieniek Ł., Saitzek S., Kopia A.	34
Badania heterozłączy $La_2Ti_2O_7$, $LaFeO_3$	
Sulek B., Krawczyk J., Kokosza A., Kuźniar N.	35
Ocena stanu naprężeń w asymetrycznie walcowanych taśmach TRB metodą szumów magnetycznych Barkhausena	
Szala M.	36
Wpływ mikrostruktury na kinetykę erozji kawitacyjnej napoiny, stopu i powłoki zawierających kobalt	

Szeliga D., Czyżewska N., Foryś J., Kusiak J., Nadolski R., Oprocha P., Pietrzyk M., Potorski P., Przybyłowicz P.	37
Zastosowanie algorytmów optymalizacji do identyfikacji parametrów modeli stochastycznych przy modelowaniu przemian fazowych	
Ścibisz K., Krawczyk J.	39
Struktura słaba ze stali wysokokrzemowej odlewanego w sposób ciągły	
Wątroba M., Bednarczyk W., Tian C., Pratama K., Maćkosz K., Michler J., Schwiedrzik J.	40
Analiza właściwości mechanicznych i odkształcenia plastycznego cynku w mikroskali	
Wieczerek K., Widmer R., Groetsch A., Schwiedrzik J., Michler J.	41
Badanie hyperprzestrzeni wysokotopliwych stopów o dużej entropii przy użyciu wysokoprępowych metod inżynierii materiałowej oraz uczenia maszynowego	
Wierzbowska K., Kochmańska A., Kochmański P.	42
Odporność warstw krzemkowo-aluminiokowych wytwarzanych metodą zawieszinową na stali X3CrTi17 w atmosferze azotującej	
Winkelmann A.	43
Badania EBSD struktury domenowej faz międzymetalicznych Cu-Sn po przemianach fazowych	
Wójciak K., Tokarski T., Cios G., Nolze G.	44
Analiza lokalnej zmiany parametrów sieci przy wykorzystaniu bezwzorcowej techniki analizy obrazu EBSD	

ODPORNOŚĆ NA KOROZJĘ WYSOKOTEMPERATUROWĄ POŁĄCZEŃ ZGRZEWANYCH METODĄ FSW ZE STOPU WE43

RESISTANCE TO HIGH TEMPERATURE CORROSION OF JOINTS WELDED BY FSW METHOD MADE OF WE43 ALLOY

Baluch K.¹, Łyczkowska K.¹, Miara D.², Gładysz K.¹, Mrowiec A.¹

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Krasińskiego 8, 40-219 Katowice, Polska

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: katarzyna.baluch@polsl.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Technologią stosowaną do łączenia wielkogabarytowych odlewów ze stopu magnezu WE43 dla przemysłu motoryzacyjnego jest zgrzewanie w procesie mieszania materiału w stanie stałym (FSW - Friction Stir Welding). Połączenie FSW powstaje w wyniku nagrzania, uplastycznienia i odkształcenia elementów przez obracające i przesuwające się narzędzie wzdłuż linii łączenia (rys. 1a). Łączenie metali zachodzi w stanie stałym, poniżej temperatury topnienia. Ciepło potrzebne do utworzenia zgrzeiny powstaje w wyniku tarcia powierzchni roboczych narzędzia (trzcienia i wieńca opory) o powierzchnie zgrzewanych elementów oraz w wyniku tarcia wewnętrznego odkształczanych mas metalu.

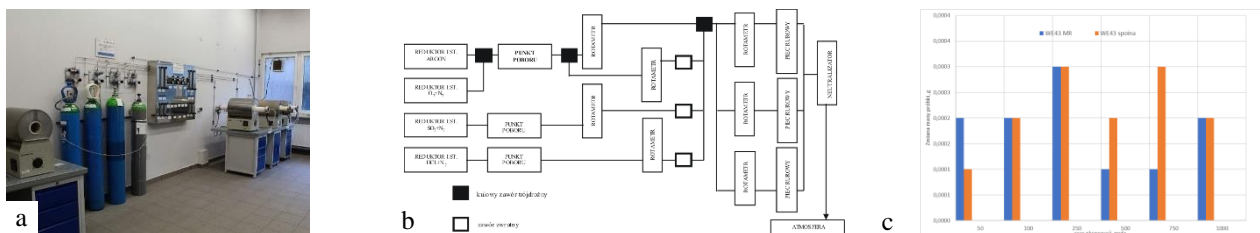


Rys. 1. Zgrzewanie stopu WE43 metodą FSW: a) schemat procesu zgrzewania FSW, b) makrostruktura złącza zgrzewanego ze stopu WE43 bez obróbki cieplnej, c) mikrostruktura złącza po przesycaniu i starzeniu (obróbka T6)

Próby zgrzewania FSW blach ze stopu magnezu WE43 o grubości 5 mm, prowadzono przy zastosowaniu prędkości obrotowej narzędzia tj. $V_n = 355$ obr./min., a prędkość zgrzewania wynosiła $V_z = 244$ mm/min. Powierzchnię tarcia wieńca opory nachylnono pod kątem $1,5^\circ$ do powierzchni zgrzewanych płyt. Makrostrukturę złącza pokazano na rys. 1b, a jego mikrostrukturę w strefie wymieszania pokazano na rys. 1c. Z tak wykonanych złączy pobrano próbki do badań odporności na korozję wysokotemperaturową w mieszance gazów symulujących spaliny silnika samochodowego spalającego olej napędowy (skład chemiczny mieszanki gazów: $9\% \text{ O}_2 + 0,02\% \text{ SO}_2 + 7\% \text{ CO}_2 + 0,15\% \text{ NO}_2$ w azocie) o temperaturze 300°C . Badania odporności na korozję wysokotemperaturową wykonano w Katedrze Metalurgii i Recyklingu Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej (rys. 2a). Stanowisko badawcze zbudowane było z pieców rurowych z zabudowanymi rurami kwarcowymi i ceramicznymi, reduktorów, punktów poboru gazu z rotametrami, układu neutralizującego oraz butli z gazami wchodzącymi w skład symulowanej mieszanki gazów (rys. 2b). Jako miarę odporności na korozję wysokotemperaturową złączy FSW przyjęto zmianę masy próbki po badaniach.

2. Najważniejsze wyniki

Badania odporności na korozję przeprowadzono w czasie do 1000 godzin, wykonując pomiary przyrostu masy produktów korozji (po 50, 100, 250, 500, 750 i 1000 godzin od rozpoczęcia badania). Dla każdej z próbek wykonywano po trzy pomiary masy, które zostały uśrednione. Odchylenie standardowe od średniej było poniżej 1% (rys. 2c).



Rys. 2. Wyniki oceny odporności złączy FSW stopu magnezu WE43 na korozję wysokotemperaturową: stanowisko badawcze zbudowane w Katedrze Metalurgii i Recyklingu na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, b) schemat stanowiska, c) zmiana masy próbek podczas eksperymentu

3. Dyskusja i wnioski

Dla złącza ze stopu WE43, niezależnie od miejsca pobrania próbek (materiał rodzimy lub zgrzeina) oraz czasu ekspozycji w temperaturze 300°C , masa próbek wyjętych odpowiednio po 50, 100, 250, 500, 750 oraz 1000 godzin praktycznie nie ulegała zmianie. Niewielkie różnice w masie próbek (na poziomie ok. $0 \div 0,03\%$) można uznać za pomijalne i stanowią błąd pomiarowy, który założono na poziomie $0,1\%$. Stwierdzono, że zarówno stop WE43 jak również złącze FSW z tego materiału są odporne na działanie spalin w temperaturze do 210°C . Wskazuje to, że technologia zgrzewania FSW może być z powodzeniem stosowana do łączenia elementów w przemyśle motoryzacyjnym.

4. Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach projektu nr SKN/SP/535438/2022 pt.: Innowacyjna technologia łączenia stopu magnezu z dodatkiem itru (WE43) metodą Friction Stir Welding. Dofinansowano przez Ministra Edukacji i Nauki ze środków z budżetu państwa w ramach programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”.

STRUKTURA ZŁĄCZY FSW STOPU MAGNEZU Z DODATKIEM ITRU WE43 STRUCTURE OF FSW JOINTS OF MAGNESIUM ALLOY WITH ADDED YTTRIUM WE43

Baluch K.¹, Miara D.², Łyczkowska K.¹, Gładys K.¹, Mrowiec A.¹

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Krasińskiego 8, 40-219 Katowice, Polska

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: katarzyna.baluch@polsl.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

W stopach Mg-Y-RE-Zr (WE) podstawowymi dodatkami stopowymi są itr, pierwiastki ziem rzadkich (RE) oraz cyrkon. W stopie WE43 głównym składnikiem mieszaniny RE jest neodym [1]. Mikrostruktura odlewniczych stopów Mg-Y-RE-Zr składa się z ziaren roztworu stałego itru (~0,7% at.) i neodymu (~0,3% at.) w magnezie i wydzieleniach bogatych w Nd na granicach. Wewnątrz ziaren obserwuje się cząstki cyrkonowe [2]. Jedną z najnowszych technologii służących do łączenia odlewów ze stopu WE43 lub ich naprawy jest zgrzewanie FSW (Friction Stir Welding). Proces ten polega na mieszaniu materiału rodzimego w stanie stałym w wyniku czego następuje jego łączenie.

W pracy wykonano próby technologiczne zgrzewania FSW odlewanych płyt ze stopu WE43, które następnie były obrabiane cieplnie w dwóch wariantach, tj. przesycanie oraz przesycanie i starzenie. Celem badań było określenie zmian struktury w procesie zgrzewania FSW i ocena wpływu obróbki cieplej. Zmiany struktury decydują o właściwościach użytkowych połączenia a tym samym o możliwości zastosowania tej technologii zgrzewania do łączenia odlewów ze stopu WE43 lub do naprawy wad odlewniczych.

2. Najważniejsze wyniki

Próbki do badań strukturalnych zostały wycięte prostopadle do kierunku zgrzewania i następnie były szlifowane i polerowane zgodnie z procedurą opisaną w pracy [3]. Przykładowe wyniki obserwacji makro i mikrostrukturalnych złączy pokazano na rys. 1. Uzupełnieniem badań była mikroanaliza składu chemicznego EDS oraz rentgenowska analiza fazowa XRD.

Tabela 1. Mikrostruktura złączy FSW stopu WE43

Obróbka	Materiał rodzimy	Strefa natarcia	Strefa środkowa	Strefa spływu
Bez obróbki cieplnej				
Przesycanie 8h/525°C powietrze				
Przesycanie 8h/525°C powietrze Starzenie: 16h/250°C powietrze				

3. Dyskusja i wnioski

Badania mikrostruktury stopu WE43 ujawniły na granicach roztworu stałego pierwiastków RE w magnezie Mg(α) eutektykę [Mg(α) + β (Mg₁₂NdY)]. Przesycanie stopu w temperaturze 525°C powoduje rozpuszczenie się tej eutektyki. W strukturze po przesycaniu ujawniono nieliczne wydzielenia faz MgY oraz Mg₁₂Y. Po starzeniu w temperaturze 250°C przez 16 godzin ujawniono strukturę jednofazową roztworu stałego Mg(α) z drobnymi wydzieleniami fazy β (Mg₁₂NdY). W odlewie ujawniono liczne pory, które w procesie zgrzewania zostały usunięte. W procesie zgrzewania FSW nastąpił bardzo silne rozdrobnienie ziaren w strefie wymieszania, a następnie w procesie przesycania obserwowano rozpuszczanie się rozdrobnionej (rozkruszonej) eutektyki Mg(α) + β (Mg₁₂NdY) a po procesie przesycania i starzenia ujawniono obszary po rekryształizacji ziaren w poszczególnych obszarach zgrzewania.

4. Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach projektu nr SKN/SP/535438/2022 pt.: Innowacyjna technologia łączenia stopu magnezu z dodatkiem itru (WE43) metodą Friction Stir Welding. Dofinansowano przez Ministra Edukacji i Nauki ze środków z budżetu państwa w ramach programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”.

5. Literatura

- [1] Avedesian M., Baker H., Magnesium and Magnesium Alloys. ASM Speciality Handbook, 1999.
- [2] Mordike B.L. Wiesner P.: Fugen von Magnesium Werkstoffen, DVS Verlag, 2005.
- [3] Adamiec J.: Spawalność odlewniczych stopów magnezu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.

WPLYW OBRÓBKII CIEPLNEJ NA MIKROSTRUKTURĘ I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STOPÓW WYSOKOENTROPOWYCH, WYTWORZONYCH PRZYROSTOWO Z PROSZKÓW ELEMENTARNYCH

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY ALLOYS MANUFACTURED USING PBF METHOD WITH ELEMENTAL POWDERS

Bardo R.^{1,*}, Fryzowicz K.¹, Dziurka R.¹, Bała P.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

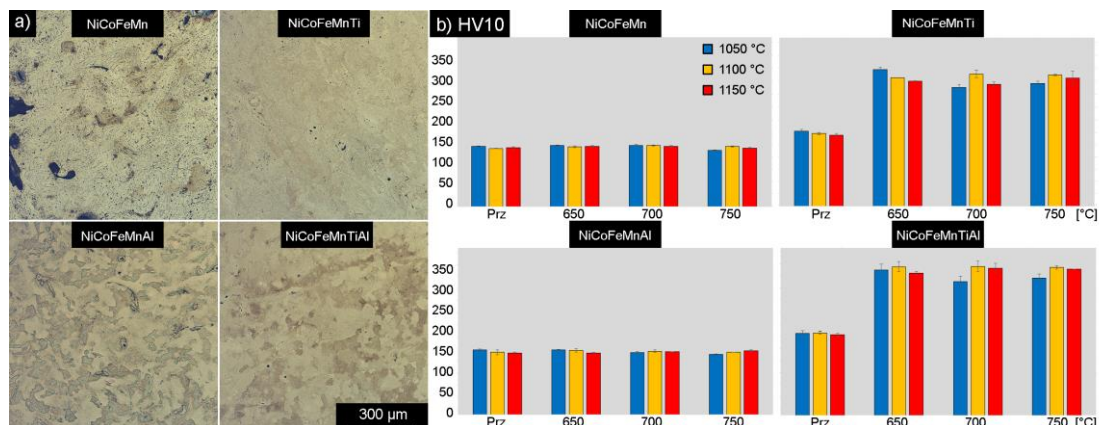
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: bardo@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Celem przeprowadzonych analiz było porównanie zastosowania różnych parametrów obróbki cieplnej na wybranych stopach HEA, które zostały wyprodukowane za pomocą techniki Powder Bed Fusion z wykorzystaniem mieszaniny proszków elementarnych. Zbadano, jak temperatura przesycania i starzenia wpływa na mikrostrukturę i twardość tych stopów. Do wytworzenia próbek posłużyła maszyna Renishaw AM400, gdzie zastosowano stały zestaw parametrów procesowych (250 W, 145 μs). Dla każdego z czterech zaprojektowanych stopów: Ni-Co-Fe-Mn, Ni-Co-Fe-Mn-Ti, Ni-Co-Fe-Mn-Al i Ni-Co-Fe-Mn-Ti-Al przebadano dwanaście zestawów parametrów obróbki cieplnej. Dokonano jakościowej oceny mikrostruktury poprzez wykorzystanie mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej oraz analizy EDS. Ponadto, przeprowadzono pomiar twardości HV10 na przekroju poprzecznym.

2. Najważniejsze wyniki

Na obrazach mikroskopowych zaobserwować można, że stop Ni-Co-Fe-Mn wykazał się najniższą jakością, z dużym udziałem porowatości i nieprzetopionych obszarów. Strukturalnie najbardziej jednolite były stopy zawierające Al oraz Ti-Al. W przypadku wszystkich materiałów zauważono całkowitą eliminację struktury dendrytycznej, która jest typowa dla procesu szybkiego krzepnięcia w technologii wytwarzania przyrostowego. Zamiast tego, obserwuje się równomiernie rozmieszczone ziarna o średnicy poniżej 100 μm. Dla stopu Ni-Co-Fe-Mn-Ti, maksymalna twardość osiągnięta została po przesycaniu z temperatury 1050°C i starzeniu w temperaturze 650°C. Te same temperatury obróbki cieplnej dały najlepsze rezultaty dla stopu Ni-Co-Fe-Mn-Al. W przypadku stopu Ni-Co-Fe-Mn-Ti-Al, najwyższa twardość zaobserwowana została po przesycaniu z temperatury 1100°C i starzeniu w 700°C.



Rys. 1. a) Mikrostruktury (LM) analizowanych stopów po przesycaniu z 1050 °C i starzeniu w 700 °C, b) Zestawienie wyników twardości

3. Dyskusja i wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie kilku wniosków. We wszystkich stopach wysokoentropowych (bez Ni-Co-Fe-Mn) można zauważyć całkowite wyeliminowanie struktury dendrytycznej dla wszystkich wariantów obróbki cieplnej. Nie obserwuje się także charakterystycznych śladów przetopu materiału wiązką lasera. Najwyższa twardość została odnotowana w stopie Ni-Co-Fe-Mn-Ti-Al. Stop czteroskładnikowy oraz zawierający aluminium cechowały się zbliżonymi wynikami, z nieznaczną przewagą Ni-Co-Fe-Mn-Al. Różnice twardości pomiędzy stanem przesyconym oraz starzonym wskazują, że jedynie w stopach zawierających tytan nastąpiło znaczące umocnienie. Może to być spowodowane większą skłonnością aluminium do tworzenia tlenków, a tym samym mniejszym udziałem tego pierwiastka w roztworze stałym, osłabiając zarówno efekt umocnienia roztworowego jak i wydzieleniowego. W porównaniu do materiałów w stanie po wydruku stopy zawierające tytan umocniły się, natomiast w pozostałych materiałach bez dodatku tytanu twardość spadła.

4. Literatura

- [1] P. Bała, K. Górecki, W. Bednarczyk, M. Watroba, S. Lech, and J. Kawalko, "Effect of high-temperature exposure on the microstructure and mechanical properties of the Al5Ti5Co35Ni35Fe20 high-entropy alloy," J. Mater. Res. Technol., vol. 9, no. 1, pp. 551–559, 2020, doi:10.1016/j.jmrt.2019.10.084.
- [2] P. Chen, S. Li, Y. Zhou, M. Yan, M.M. Attallah, Fabricating CoCrFeMnNi high entropy alloy via selective laser melting in-situ alloying, Mater. Sci. Technol. vol. 43 (2020) 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.002>.
- [3] Z. Tong, X. Ren, J. Jiao, W. Zhou, Y. Ren, Y. Ye, E. A. Larson, J. Gu, "Laser additive manufacturing of FeCrCoMnNi high-entropy alloy: Effect of heat treatment on microstructure, residual stress and mechanical property", J. Alloys Compd., vol 785, 2019, doi:10.1016/j.jallcom.2019.01.213.
- [4] W. Lin, Y. Chang, T. Hsu, S. Gorsse, F. Sun, T. Furuhashi, A. Yeh, "Microstructure and tensile property of a precipitation strengthened high entropy alloy processed by selective laser melting and post heat treatment, Addit. Manuf., vol 36, 2020, doi:10.1016/j.addma.2020.101601.

WYBRANE ASPEKTY WDROŻENIA TECHNOLOGII KUCIA I WALCOWANIA PIERŚCIENI WIELKOGABARYTOWYCH

SELECTED ASPECTS OF IMPLEMENTING FORGING AND ROLLING TECHNOLOGY FOR LARGE RINGS

Bączek M.^{1*}, Gąsiorkiewicz M.²

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: marcin.baczek@pit.lukasiewicz.gov.pl

5. Wprowadzenie i metodyka badań

We współczesnych maszynach, urządzeniach i instalacjach coraz większe zastosowanie znajdują wyroby pierścieniowe jako odpowiedzialne części konstrukcyjne, np. kołnierzowe, służące do łączenia elementów w instalacjach energetycznych, pracujących w stanie nadkrytycznym. Stanowią także podzespoły precyzyjnych wielkogabarytowych części maszyn, np. łożysk w elektrowniach wiatrowych, czy też używane są jako łączniki w szkieletach samolotów. Początkowo pierścienie wytwarzane były metodą kucia swobodnego na trzpieniu, jednak ich wymiary były limitowane wielkością przestrzeni roboczej prasy. Ponadto użycie w tym procesie stosunkowo prostych narzędzi powodowało konieczność stosowania dużych naddatków technologicznych.

Wdrożenie metody kuto – walcowanej kształtowania pierścieni stanowiło swego rodzaju przełom technologiczno - organizacyjny. Walcarki do wytwarzania pierścieni o kompaktowej budowie umożliwiały uzyskiwanie pierścieni o wysokiej dokładności geometrycznej i rozmiarach średnic do kilku metrów.

Celem pracy było wdrożenie metody kucia i walcowania pierścieni w kuźni Zarmen FPA, począwszy od zaprojektowania layoutu, wstawienia nowych urządzeń i maszyn w istniejącą już infrastrukturę, po wykonanie fizyczne pierścieni i ich badania. Wdrożenie takiego procesu do praktyki firmy jest trudne i wymaga wielu zabiegów, aby proces kształtowania mógł przebiegać w sposób gwarantujący wykonanie poprawnego pierścienia. Nie bez znaczenia jest wsparcie programami do symulacji numerycznych procesu, które umożliwiają projektowanie procesu kształtowania wsadu pierścieniowego na prasie jak i procesu walcowania. Ten ważny aspekt również został zaprezentowany w pracy wraz z przykładowym pierścieniem ze stali P91 wykonanym wg opracowanej technologii. Dla pierścienia przedstawiono wybrane wyniki badań materiałowych.

6. Najważniejsze wyniki

W wyniku opracowanej technologii kształtowania wykonano pierścień kołnierzowy ze stali P91, który poddano pomiarom geometrycznym, twardości i badaniom właściwości wytrzymałościowych.



Rys. 1. Ukształtowany pierścień kołnierzowy na walcach w Kuźni Zarmen FPA

7. Dyskusja i wnioski

- Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych można stwierdzić, że możliwe jest prowadzenie procesu walcowania w warunkach przemysłowych tylko na podstawie uzyskanych wyników z symulacji numerycznych. Ze względu na możliwość obniżenia kosztów wykonania pierścieni w warunkach zakładu przemysłowego dalsze symulacje procesów wytwarzania nowych wyrobów będą prowadzone w celu określenia bazowych parametrów procesu walcowania oraz sprawdzania możliwości wytwarzania pierścieni w zainstalowanych urządzeniach technologicznych.
- Przeprowadzone badania teoretyczno-doświadczalne nad procesem wytwarzania pierścieni metodą kuto-walcowaną w warunkach rzeczywistych pozwoliły na uzyskanie wyników, które umożliwiły wykonanie pierścieni demonstratorów.

8. Podziękowania

Projekt w ramach Działania 1.1: Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałanie 1.1.2: Prace B+R związane z wytworzeniem instalacji pilotażowej/demonstracyjnej Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Umowa o dofinansowanie projektu podpisana z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju w Warszawie dnia 01.07.2016 r. Umowa POIR.01.01.02-00-0079/16

9. Literatura

- [1] J. M. Allwood, A. E. Tekkaya, T. F. Stanistreet: The Development of Ring Rolling Technology - Part 2: Investigation of Process. Behaviour and Production Equipment. Steel Research International 76(7): July 2005, s. 491-507
- [2] H. QI, Y. LI: Research status and developing trends on the ring rolling process of profile ring parts. Procedia Engineering 207 (2017), s. 1260 – 1265.
- [3] R. Keeton: Ring Rolling, Metals handbook: forming and forging, ASM International, Metals Park, OH, 1988.
- [4] Hua, L., Qian, D. S., and Pan, L. B.: Deformation Behaviors and Conditions in L-Section Profile Cold Ring Rolling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 11, 2009, s. 5087-5096.
- [5] Y.M. Zhao, D.S. Qian, Effect of rolling ratio on groove-section profile ring rolling, J. Mech. Sci. Technol. 24 (2010), s.1679-1687.

POPRAWA STABILNOŚCI TERMICZNEJ DROBNOZIARNISTYCH, BIODEGRADOWALNYCH STOPÓW Zn-Li-Mn-Mg-Cu WYTWARZANYCH POPRZEZ SZYBKĄ KRYSZALIZACJĘ I SKRĘCANIE POD WYSOKIM CIŚNIENIEM

ENHANCED THERMAL STABILITY OF ULTRAFINE-GRAINED BIODEGRADABLE Zn-Li-Mn-Mg-Cu ALLOYS PRODUCED BY RAPID SOLIDIFICATION AND HIGH-PRESSURE TORSION

Bednarczyk W.^{1,*}, Lewandowska M.¹

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: wiktor.bednarczyk@pw.edu.pl

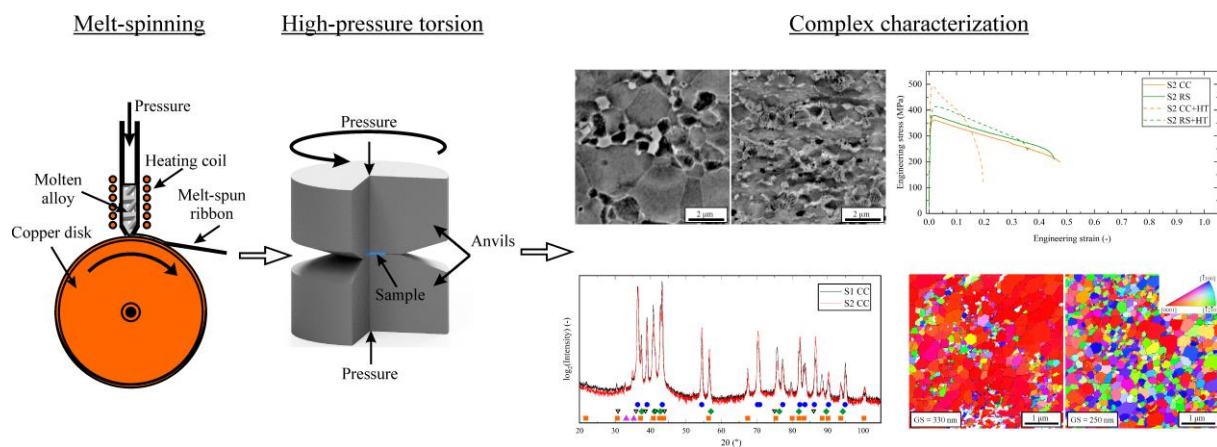
1. Wprowadzenie i metodyka badań

W ostatnich latach stopy cynku zyskały popularność ze względu na potencjalne zastosowanie na biodegradowalne implanty kostne i stenty [1]. Poprawa właściwości mechanicznych tych stopów w dużej mierze zależy od zastosowanych dodatków stopowych. Niemniej jednak, segregacja składu chemicznego powstająca podczas odlewania stopów cynku utrudnia jednorodne rozmieszczenie faz umacniających w mikrostrukturze, co negatywnie wpływa na efektywność dodatków stopowych [2].

W przedstawionych badaniach zastosowano szybką krystalizację, poprzez odlewanie na wirujące koło miedziane, jako metodę pozwalającą na zmniejszenie niejednorodności chemicznej. Tak wytworzone taśmy ze stopów Zn-0.33Li-0.39Mn i Zn-0.33Li-0.27Mn-0.14Mg-0.1Cu zostały poddane konsolidacji w temperaturze otoczenia poprzez skręcanie pod wysokim ciśnieniem (ang. High Pressure Torsion – HPT). Następnie wykonano badania stabilności mikrostruktury po wygrzewaniu przez 10 minut w temperaturze od 140 °C do 210 °C. Charakterystykę uzyskanych materiałów sporządzono na podstawie badań SEM, jednoosiowego rozciągania, twardości, nanoindentacji, XRD i EBSD.

2. Najważniejsze wyniki

Zastosowanie szybkiej krystalizacji i skręcania pod wysokim ciśnieniem umożliwiło wytworzenie jednorodnego materiału o jednorodnej mikrostrukturze i wielkości ziarna poniżej 360 nm. Pomiarzy XRD wykazały następujące fazy: Zn, α LiZn₄, β LiZn₄ i MnZn₁₃ w obu stopach. Badania wytrzymałościowe wskazują wzrost wytrzymałości po krótkotrwałym wygrzewaniu w 190 °C przez 10 minut do Re = 440 MPa, Rm = 491 MPa i wydłużeniu do zerwania 23 %. Badania nanoindentacyjne ze zmienną prędkością odkształcenia ujawniły poślizg po granicach ziaren i dyfuzję jako dominujące mechanizmy odkształcenia w badanych stopach.



Rys. 1. Schemat procesu wytwarzania badanych materiałów (a) oraz najważniejsze wyniki: porównanie mikrostruktury po wygrzewaniu (b), wpływ procesu wytwarzania na wytrzymałość na rozciąganie (c), badania składu fazowego (d) i pomiary wielkości ziarna (e).

3. Dyskusja i wnioski

Przedstawione badania pokazują efektywne umocnienie i poprawę stabilności termicznej badanych stopów poprzez zastosowanie szybkiej krystalizacji i skręcania pod wysokim ciśnieniem. Otrzymane wyniki sugerują możliwości zastosowania szybkiej krystalizacji do wytwarzania stopów cynku również poprzez przeróbkę plastyczną na gorąco.

4. Podziękowania

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki z grantu nr UMO-2021/40/C/ST5/00071 oraz przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej w ramach stypendium START 003.2023.

5. Literatura

- [1] P.K. Bowen, J. Drelich, J. Goldman, Zinc Exhibits Ideal Physiological Corrosion Behavior for Bioabsorbable Stents, *Adv. Mater.* 25 (2013) 2577–2582. <https://doi.org/10.1002/adma.201300226>.
- [2] M. Wątroba, W. Bednarczyk, J. Kawałko, P. Bała, Fine-tuning of mechanical properties in a Zn–Ag–Mg alloy via cold plastic deformation process and post-deformation annealing, *Bioact. Mater.* 6 (2021) 3424–3436. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.03.017>.

ANALIZA TOPOGRAFII I ZWILŻALNOŚCI POWIERZCHNI STALI 316L PO PROCESIE LASEROWEGO TEKSTUROWANIA

ANALYSIS OF THE TOPOGRAPHY AND WETTABILITY OF 316L STEEL SURFACE AFTER THE LASER TEXTURING PROCESS

Błajszczak Ł.*¹, Kąc S.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: blajszcz@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Jednym z najtańszych biomateriałów metalicznych, stosowanych w implantologii jest stal nierdzewna 316L. Jest to stal paramagnetyczna, o strukturze austenitycznej oraz wysokim module sprężystości (ok. 210 GPa). Jest to w pewnym stopniu niekorzystne, ponieważ jest to dużo większa wartość niż moduł sprężystości kości (ok. 30 GPa). Ponadto stal ta cechuje się stosunkowo niską biotolerancją. Biomateriał wybrany na implant powinien mieć odpowiednie właściwości mechaniczne (odporność na zużycie), dobrą biokompatybilność oraz odporność na korozję. Obiecującą metodą poprawy właściwości tribologicznych oraz fizyko-chemicznych powierzchni jest teksturowanie laserowe, które zapewnia dobrą kontrolę nad procesem oraz pozwala na wytwarzanie regularnej topografii, zmianę zwilżalności, odporności naścieranie oraz odporności korozyjnej. W niniejszej pracy do laserowego teksturowania wykorzystano laser włóknowy TC-200/ECL T 200M MA o mocy wyjściowej 200 W oraz długości fali 1064 nm. Wybrano trzy częstotliwości pracy lasera: 1000 kHz, 2000 kHz i 4000 kHz. Następnie wybrane próbki poddano wygrzewaniu w piecu komorowym w temperaturze 100 °C przez 20 godzin bez atmosfery ochronnej. Obserwacje morfologii powierzchni wykonano przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (FEI Inspect S50). Badania chropowatości i topografii powierzchni wykonano za pomocą profilometru optycznego (WYKO NT930), a badania zmiany zwilżalności powierzchni oraz pomiar swobodnej energii powierzchniowej przy użyciu goniometru Krüss DSA 25. Badania zwilżalności wykonywano co 7 dni przez miesiąc badając w ten sposób zależność zmiany kąta zwilżalności od czasu.

2. Najważniejsze wyniki

Badania morfologii powierzchni wykazały, że na powierzchni stali po procesie laserowego teksturowania powstała regularna tekstura, tworząc przecinające się bruzdy, pomiędzy którymi pozostaje nieobrobiona powierzchnia stali. Badania zwilżalności powierzchni pozwoliły na określenie zmiany charakteru powierzchni z hydrofilowego na hydrofobowy. Dla każdej próbki po 14 dniach od obróbki laserowej uzyskane powierzchnie stały się hydrofobowe (kąt zwilżania wynosił powyżej 90°), a najwyższy kąt jaki udało się uzyskać wynosił około 110°. Wraz ze wzrostem kąta zwilżania zmniejszała się swobodna energia powierzchniowa, a przy najwyższych wartościach kąta część polarna energii wynosiła 0 mJ/m². Zmiany te mogą wynikać z faktu, że tlenki, w których chrom i żelazo występujące na wyższym stopniu utlenienia mogące powstawać na powierzchni stali są niepolarne. Badania profilometryczne pozwoliły na określenie chropowatości powierzchni, profilu tekstury oraz współczynnika rozwinięcia powierzchni (ok. 2%). Parametr chropowatości Ra zmieniał się od 500 nm (dla próbki obrabianej z częstotliwością 1000 kHz) do ok. 6 µm (dla próbek obrabianych z częstotliwością 2000 kHz i 4000 kHz).

3. Dyskusja i wnioski

Teksturowanie laserowe prowadzi do zmiany morfologii oraz topografii powierzchni w sposób kontrolowany. Pozwala na zmianę charakteru powierzchni z hydrofilowej na hydrofobową oraz zmniejsza swobodną energię powierzchniową. Badania chropowatości wykazały, że chropowatość powierzchni ulega zwiększeniu przede wszystkim przy zastosowaniu największych częstotliwości, czyli 2000 kHz i 4000 kHz.

4. Podziękowania

Badania sfinansowano w ramach subwencji WIMiIP nr 16.16.110.663

Podziękowania dla firmy ECL TECH Polska Sp. Z o.o. za możliwość przeprowadzenia obróbki laserowej.

5. Literatura

- [1] N. Sirdeshmukh, G. Dongre, Laser micro & nano texturing for enhancing osseointegration and antimicrobial effect of biomaterials: A review, *Materials Today: Proceedings*, 44, 2348-2355, 2021
- [2] M. Geetha, A. K. Singh, R. Asokamani, A. K. Gogia Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopedic implants – A review, *Progress in Materials Science*, 54, 397-425, 2009
- [3] B. Mao, A. Siddaiah, Y. Liao, P. L. Menezes Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 153-173, 2020
- [4] W. Tong, D. Xiong Direct laser texturing technique for metal surfaces to achieve superhydrophobicity, 23, 100651, 2022

ZINTEGROWANY MODEL CIEPLNO-METALURGICZNY PROCESU CHŁODZENIA GAZEM POD WYSOKIM CIŚNIENIEM KOŁA ZĘBATEGO WYKONANEGO Z PYROWEAR 53

COUPLED THERMAL AND METALLURGICAL MODELLING OF PYROWEAR 53 RING GEARS UNDER HIGH PRESSURE GAS QUENCHING

Bzowski K.^{1,*}, Rauch Ł.¹, Pietrzyk M.¹, Łazarski J., Milenin I.

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

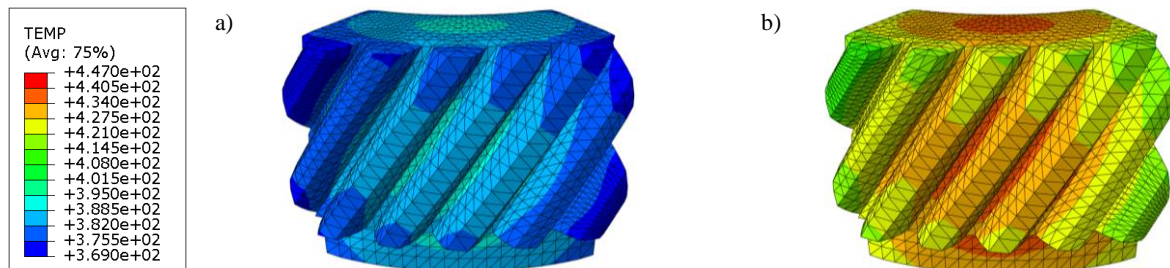
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: kbzowski@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

W przemyśle lotniczym, procesy technologiczne są zdefiniowane przez rygorystyczne wymagania odnośnie jakości i niezawodności produktów. W procesie produkcji przekładni istotne jest kontrolowanie składu fazowego oraz mikrostruktury warstwy powierzchniowej. Ta warstwa jest kluczowa dla właściwości mechanicznych, takich jak odporność na zużycie i wytrzymałość zmęczeniową zębów przekładni. Procesy obróbki termochemicznej, zwłaszcza nawęglanie, odgrywają zasadniczą rolę w produkcji. Stanowią one narzędzie do precyzyjnej modyfikacji właściwości nawęglonej warstwy, umożliwiając dostosowanie jej do konkretnych wymagań funkcjonalnych. Wykorzystując takie techniki jak hartowanie, obróbka cieplna i odpuszczanie w niskiej temperaturze, można skutecznie sterować charakterystykami nawęglonej warstwy. Te procesy prowadzą do ewolucji mikrostruktury, co znacząco wpływa na ostateczne właściwości materiału. Postępy w technologii, nowe gatunki stali takie jak Pyrowear 53, oraz nawęglanie próżniowe, pozwalają na przeprowadzenie hartowania gazem w jednej komorze pieca zaraz po cyklu nawęglania, bez potrzeby chłodzenia i ponownego nagrzewania. Do części eksperymentalnej wykorzystano stal Pyrowear 53. Przeprowadzono testy dylatometryczne ze stałymi prędkościami chłodzenia w zakresie 0.01°C/s-100°C/s, aby dostarczyć dane do identyfikacji parametrów modelu. W pracy wykorzystano model JMAK (Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov), który został udoskonalony na potrzeby symulacji przemian w stali Pyrowear 53. Unowocześnienie modelu JMAK polegało na wprowadzeniu zależności temperaturowej parametrów modelu oraz uwzględnieniu wpływu rozmiaru ziarna austenitu. Celem było poprawienie prognoz składu fazowego, uwzględniając wydzielanie węglików i niejednorodność stężenia węgla w kole zębatym po nawęglaniu. Opracowano model numeryczny chłodzenia opartego na analizie CFD (Computational Fluid Dynamics) przy użyciu oprogramowania Abaqus. W pełni sprzężone rozwiązanie numeryczne: chłodzenia oraz przemian fazowych pozwoliło na symulacje procesu hartowania w gazie z uwzględnieniem wpływu przemiany martenzytycznej. Wstępne wyniki zostały uzyskane dla wycinka koła zębatego. Wyzwanie stanowiła symulacja całego koła, a praktyka przemysłowa wskazywała na konieczność adaptacji procesu również do wspólnego hartowania wielu części w tym samym czasie. Złożoność obliczeniowa w pełni sprzężonej symulacji CFD oraz modelu przemian fazowych nie pozwoliłaby na uzyskanie wyników w pożądanym czasie. W celu poprawy efektywności obliczeń wykonano analizę odwrotną mającą na celu identyfikację zastępczych współczynników przyjmowania ciepła i całkowitą rezygnację z modelu przepływu na rzecz tradycyjnego modelu konwekcyjnej wymiany ciepła.

2. Najważniejsze wyniki

Kluczowym dla prezentowanego rozwiązania jest wpływ przemian fazowych na uzyskane rozkłady temperatur (rys 1).



Rys. 1. Rozkład temperatur na powierzchni wycinka koła zębatego w czasie $t=360s$: bez uwzględnienia przemian fazowych (a), z uwzględnieniem przemian fazowych (b)

3. Dyskusja i wnioski

Krytyczna prędkość chłodzenia dla próbek rdzenia o nominalnym składzie chemicznym wynosiła około 3°C/s. Dla prędkości chłodzenia poniżej 0.02°C/s przewidywano czysto ferrytyczną mikrostrukturę. Krytyczna prędkość chłodzenia dla próbek po nawęglaniu wynosiła około 0.1°C/s. Przy wolnym chłodzeniu w mikrostrukturze pojawiała się perlit, ale martenzyt był obserwowany w całym badanym zakresie prędkości chłodzenia. Wieloskalowe symulacje wykazały, że chłodzenie z prędkością wlotową gazu 9m/s pozwala na uzyskanie czysto martenzytycznej mikrostrukturę.

4. Podziękowania

Wsparcie finansowe NCBiR, projekt nr. TECHMATSTRATEG2/406725/NCBR/2020.

5. Literatura

[1] Rauch Ł., Zalecki W., Kuziak R., Garbarz B., Raga K., Bzowski K., Pietrzyk M.: Numerical simulations of aircraft engine ring gears quenching by using mean field model of phase transformations in Pyrowear Steel 53. Journal of Aerospace Engineering, doi: 10.1061/JAEEZ/ASENG-5014, in-print

WPLYW OBRÓBKI CIEPLNO-PLASTYCZNEJ NA JAKOŚĆ POWIERZCHNI I STRUKTURY CuZn21Si3P

THE EFFECT OF THERMO-PLASTIC PROCESSING ON THE SURFACE QUALITY AND STRUCTURE OF CuZn21Si3P

Chaczyk A.^{1,2,*}, Skoda P.³, Krawczyk J.⁴

¹ SANHA Polska Sp. z o.o., ul. Poznańska 49, 59-220 Legnica, Polska

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Szkoła Doktorska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

³ SANHA GmbH & Co. KG, Im Teelbruch 80, 45219 Essen, Niemcy

⁴ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: agnieszka.chaczyk@sanha.com

1. Wprowadzenie i metodyka badań

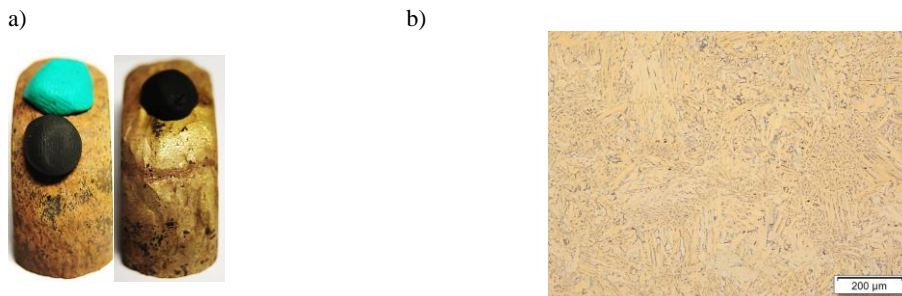
Praca dotyczy charakterystyki materiału rozważanego jako jeden z potencjalnie możliwych do zastosowania w ramach tematu badawczego „Zrównoważone złączeni pozbawione ołowiu do instalacji wody pitnej i gazu - skrawalność i możliwość łączenia”, co jest rozwinięciem wyników badań prowadzonych w ramach projektu „Opracowanie i wdrożenie do produkcji innowacyjnych złączy z bezołowiowych stopów miedzi do instalacji wody pitnej, sanitarnej i technicznej z obniżonymi oporami przepływu do połączeń w instalacjach opartych o rury PE”. Głównymi założeniami projektu było zmniejszenie energochłonności, materiałochłonności i emisji CO₂ poprzez zwiększenie średnicy zewnętrznej króćca przyłączeniowego z 7 do 9 mm i wyeliminowanie operacji wyżarzania rekrytalizującego, w wyniku zastosowania kontrolowanego chłodzenia po kuciu. Materiałem testowym był bezołowiowy mosiądz CuZn21Si3P, którego użycie jest odpowiedzią na ograniczenia dotyczące zawartości ołowiu. Przykładem takich ograniczeń jest dyrektywa DWD 2020/2184, zgodnie z którą dla wszystkich nowych materiałów do kontaktu z wodą pitną zawartość ołowiu w wodzie z kranu nie powinna przekraczać 5 µg/l [1]. Stop CuZn21Si3P może stanowić alternatywę dla stopów miedzi z ołowiem pod względem skrawalności [2] i odporności na odcynkowanie [3].

Przedmiotem prezentowanych badań jest proces kształtowania termoplastycznego, który pozwala na określenie zależności wpływu wielkości odkształcenia, temperatury początku i końca kucia oraz szybkości chłodzenia na kształtowanie się struktury iglastej w próbkach o różnych wymiarach nominalnych.

Badania prowadzono na stanowisku wyposażonym w prasę mechaniczną i laboratoryjny tunel chłodzący pozwalający na sterowanie prędkością chłodzenia za pomocą pokręteł. Testy przeprowadzono dla następujących parametrów: temperatura: 700°C, 770°C, 820°C; stopień odkształcenia: 50%, 70%. Po procesie próbki chłodzono za pomocą tunelu chłodzącego (moc maks. i min.) lub bez.

2. Najważniejsze wyniki

Po procesie obróbki cieplno-plastycznej sklasyfikowano jakość odkuwki w oparciu o obserwacje powierzchni. W niniejszej pracy omówione zostały nieakceptowalne warunki odkształcenia powodujące tworzenie się na powierzchni badanych próbek reliefu, który świadczy o przegrzaniu materiału i występowaniu w nim struktury iglastej.



Rys. 1. Przykładowe próbki: a) nieakceptowalna jakość powierzchni po obróbce cieplno-plastycznej, b) mikrostruktura próbki posiadającej nieakceptowalną jakość powierzchni po odkształcaniu w temperaturze 770°C, dla stopnia odkształcenia 50%, maksymalnej szybkości chłodzenia i wymiarze nominalnym próbki $\phi 30 \times 35$

3. Dyskusja i wnioski

Z przeprowadzonych badań można wywnioskować, że zgodnie z początkową klasyfikacją próbki z kategorii czarnej, czarno/seledynowej (oznaczenie na rys. 1a) charakteryzują się strukturą iglastą. Analizując parametry procesu można zauważyć, że struktura iglasta wystąpiła w próbkach nagranych do temperatury 770°C oraz powyżej. Ponadto w temperaturze powyżej 770°C tworzenie się struktury iglastej jest niezależne od szybkości chłodzenia. Stopień odkształcenia 50% nie wpływa znacząco na umocnienie materiału, wzrost twardości można zaobserwować przy odkształceniu wynoszącym 70%. Dodatkowo należy podkreślić, że nominalny wymiar próbki nie wpływa na występowanie struktury iglastej przy zastosowanych parametrach obróbki cieplno-plastycznej.

4. Podziękowania

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach VI edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Praca dofinansowana w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

5. Literatura

[1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

[2] Schultheiss F., Johansson D., Linde M., Tam P. L., Bushlya V., Zhou J., Nyborg L. & Ståhl J.-E.: Machinability of CuZn21Si3P brass, Materials Science and Technology 2016, 32:17, p. 1744-1750.

[3] Choucri J., Zanotto F., Grassi V., Balbo A., Touhami M. E., Mansouri I., Monticelli C.: Corrosion Behavior of Different Brass Alloys for Drinking Water Distribution Systems, Metals 2019, 9:6, 649.

MIKROSTRUKTURA ORAZ WŁASNOŚCI STOPU WYSOKOENTROPOWEGO $\text{Al}_{0.5}\text{CoCu}_{0.25}\text{FeNi}$ WYTWARZANEGO DROGA TOPIENIA INDUKCYJNEGO MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF $\text{Al}_{0.5}\text{CoCu}_{0.25}\text{FeNi}$ HIGH ENTROPY ALLOY PRODUCED BY INDUCTION MELTING

Chrzan K.^{1,2,*}, Kalandyk B.¹, Małyszka M.^{1,2}, Wilk-Kołodziejczyk D.^{1,2}, Grudzień-Rakoczy M.²

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

² Sieć Badawcza Łukasiewicz- Krakowski Instytut Technologiczny, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: chrzan@agh.edu.pl

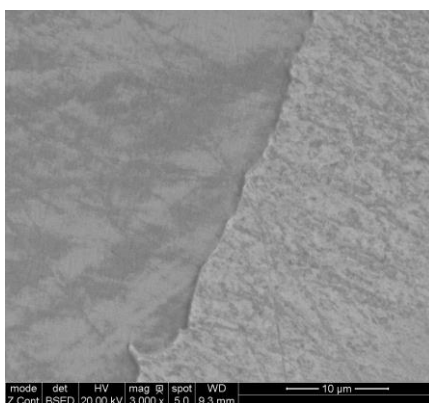
1. Wprowadzenie i metodyka badań

Stopy wysokoentropowe są materiałami których dynamiczny rozwój został zapoczątkowany stosunkowo niedawno [1,2]. Aby materiał mógł zostać zakwalifikowany jako stop wysokoentropowy, musi się on składać z co najmniej pięciu pierwiastków o zawartości każdego z nich pomiędzy 5 a 35% objętości atomowej, bądź też posiadać entropię konfiguracji większą niż $12,471 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ [3]. Wbrew pierwotnym twierdzeniom, wiele takich materiałów wykazuje się strukturą roztworu stałego bądź mieszaniną roztworów stałych, co sprawia że posiadają użyteczne własności.

Badany stop $\text{Al}_{0.5}\text{CoCu}_{0.25}\text{FeNi}$ wytworzony został poprzez wytop w laboratoryjnym piecu indukcyjnym. Ciekły stop zalewany był do form ceramicznych. W następnym kroku wykonane zostały badania DSC, tak aby możliwe było wstępne określenie temperatury wyżarzania w celu dalszego ujednorodnienia materiału. Po procesie wyżarzania przeprowadzono badania mikrostruktury przy pomocy SEM, dokonano analizy EDS oraz XRD. Twardość została wykonana przy pomocy metody Vickersa stosując obciążenie 5 kG. Statyczną próbę rozciągania wykonano w temperaturze otoczenia zgodnie z normą DIN EN ISO 6892-1 / ISO 10113 / ISO 10275.

2. Najważniejsze wyniki

Badania DSC wykonane na materiale w stanie wyjściowym wykazały występowanie przemiany w zakresie $800\text{-}850^\circ\text{C}$. W zawiązku z tym zdecydowano się na obróbkę cieplną w temperaturze 900°C z czasem wytrzymania 10 godzin. Mikrostruktura stopu składa się z dużych ziaren z wyraźnymi granicami (Rys. 1).



Rys. 1. Mikrostruktura badanego stopu

Analiza powierzchniowa wykonana metodą EDS pokazuje że wszystkie pierwiastki są rozłożone w stopie w sposób równomierny. Wykonana analiza metodą XRD pokazuje że badany stop składa się w głównej mierze z roztworu stałego typu ścienni centrowanego.

Średnia twardość badanego stopu wynosi 130 HV5. Otrzymane wyniki uzyskane ze statycznej próby rozciągania wskazują, że badany stop charakteryzuje się dobrą kombinacją właściwości wytrzymałościowych (R_m - 465 MPa, $R_{p0.2}$ -271 MPa) i plastycznych (A-60% Z) co znalazło potwierdzenie w charakterze przelomów próbek po przeprowadzonych badaniach. Badania fraktograficzne potwierdziły, że badany stop posiada typowy przelom plastyczny.

Dyskusja i wnioski

Materiał do badań został wytworzony metodą topienia w piecu indukcyjnym z atmosferą ochronną, potwierdzając tym samym, że taka technologia może być z powodzeniem stosowana dla stopów należących do grupy HEA. Analiza uzyskanych wyników badań wskazuje, że badany stop charakteryzuje się strukturą roztworu stałego. Analiza EDS potwierdziła, że wszystkie pierwiastki tworzące stop (Al., Co, Cu, Fe, Ni), są rozłożone w sposób równomierny, co może sugerować, że stop składa się z jednej fazy. Wytworzony materiał odznacza się stosunkowo niską twardością, jednakże posiada bardzo dobrą plastyczność (wydłużenie 60%) przy wytrzymałości na rozciąganie ok. 450 MPa.

3. Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach doktoratu wdrożeniowego- edycja V (nr. proj. 68.10.170.07210)

4. Literatura

W tej sekcji należy wymienić kluczowe pozycje literaturowe.

- [1] Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials Today*, Volume 19, Issue 6, 2016, Pages 349-362, ISSN 1369-7021, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.026>.
- [2] Yeh, Jien-Wei & Chen, S.-K & Lin, Su-Jien & Gan, Jon-Yiew & Chin, Tsung-Shune & Shun, Tian & Tsau, C.-H & Chang, S.Y. (2004). Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 6. 299 - 303. 10.1002/adem.200300567.
- [3] Cantor, Brian & Chang, Isaac & Knight, P. & Vincent, A.J.B.. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 375-377. 213-218. 10.1016/j.msea.2003.10.257.

POSTĘP TECHNIKI EBSD RECENT ADVANCES IN EBSD

Cios G.^{1,*}

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica, Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: ciosu@agh.edu.pl

Dyfrakcja elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) to technika oparta na skaningowym mikroskopie elektronowym, która umożliwia badanie materiałów krystalicznych. W ostatnich latach poczyniono znaczące postępy w tej technice. Podczas prezentacji autor chciałby odnieść się subiektywnie do kilku najważniejszych osiągnięć.

Rozwój detektorów EBSD opartych na technologii CMOS w ostatnich latach pozwolił na podwojenie prędkości detektorów opartych na technologii CCD. W 2017 i 2018 roku dwie wiodące na rynku firmy wytworzyły detektory EBSD oparte na technologii CMOS, których maksymalna prędkość przekroczyła 3000 obrazów na sekundę (PPS). Później, po drobnych aktualizacjach, oba detektory osiągnęły prędkość >5000 obrazów na sekundę z rozdzielczością 120x120 pikseli i 156x88 pikseli [1,2]. Jest to ponad trzy razy szybciej niż dostępne wcześniej detektory CCD (które pozwalały na maksymalnie ~1500 PPS przy rozdzielczości 30x30 pikseli). Oznacza to, że obszar 2 x 2 mm może być teraz mapowany z krokiem 1 mikrometra (4 miliony punktów) w ciągu 15 minut, dostarczając kompletnych danych przestrzennych dotyczących fazy i orientacji krystalicznej. Z drugiej strony skomercjalizowano pierwszy bezpośredni detektor elektronów EBSD, który nie jest tak szybki jak te wymienione powyżej, ale jest bardzo czuły i umożliwia filtrowanie energii [3].

Wraz z rozwojem detektorów opracowano nowe metody indeksowania obrazów dyfrakcyjnych. Oprócz klasycznego podejścia opartego na transformacji Hougha, opracowano indeksowanie słownikowe (DI) [4] i indeksowanie sferyczne (SI) [5]. Inną grupą są techniki udoskonalania orientacji, "Refined accuracy" (RA) [6] i „Pattern matching” (PM) [7]. SI, DI i PM opierają się na dynamicznej symulacji obrazów dyfrakcyjnych [8]. W DI symulowany jest słownik obrazów dyfrakcyjnych, obejmujący przestrzeń orientacji z określoną rozdzielczością kątową. Następnie wszystkie obrazy eksperymentalne są porównywane ze wszystkimi ze słownika. Wreszcie, najlepiej dopasowane orientacje ze słownika są traktowane jako prawidłowe na mapie orientacji. DI jest czasochłonną metodą, ale dowiodła swojej wartości poprzez indeksowanie obrazów o niskiej jakości. Z drugiej strony, indeksowanie sferyczne nie wymaga generowania słownika i może być tak szybkie jak techniki oparte na transformacji Hougha (>1000 PPS) i jest podobnie pomocne w przypadku wzorców niskiej jakości jak DI. RA to technika udoskonalania orientacji, która przyjmuje początkowo rozwiązana orientację i dopasowuje geometrycznie symulowane krawędzie pasm Kikuchiego do krawędzi eksperymentalnych. RA zapewnia dokładność orientacji mniejszą niż 0,1° [6].

PM wykorzystuje również początkową orientację uzyskaną za pomocą innych technik, a następnie porównuje dynamicznie symulowany wzorec z wzorcem eksperymentalnym i stosuje metodę simpleksu Nelder-Meada, aby znaleźć najlepsze dopasowanie (znormalizowany współczynnik korelacji krzyżowej dwóch obrazów). Przy wystarczającej jakości i rozdzielczości obrazu eksperymentalnego, PM zapewnia czułość na zmiany orientacji o 0,03° [9].

Istnieją nowo opracowane narzędzia do analizy map orientacji. Wiele z nich jest włączonych do zestawu narzędzi MTEX, bezpłatnego i działającego jako zestaw narzędzi Matlab [10]. Intensywnie badanym tematem jest rekonstrukcja ziarna macierzystego austenitu z martenzytu. Na podstawie danych martenzytu RPC na ciele można odtworzyć wysokotemperaturową mikrostrukturę austenitu RSC. Innymi wartymi wspomnienia darmowymi lub częściowo darmowymi programami do analizy EBSD są EMsoft [11], ATEX [12], KikuchiPy [13], AstroEBSD [14], CALM [15].

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2020/37/B/ST5/03669 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Literatura

- [1] <https://www.oxinst.com/news/new-ebsd-detector-symmetry-increases-ebsd-speed-by-an-order-of-magnitude>
- [2] <https://www.edax.com/pressreleases/news/2018/june/edax-launches-new-velocity-ebsd-camera>
- [3] <https://www.edax.com/pressreleases/news/2020/may/edax-launches-new-clarity-direct-electron-detector-for-ebsd>
- [4] Y.H. Chen, S.U. Park, D. Wei, G. Newstadt, M.A. Jackson, J.P. Simmons, M. De Graef and A.O. Hero, *Microscopy and Microanalysis* **21** (2015), p. 739–752.
- [5] W.C. Lenthe, S. Singh, and M. De Graef, *Ultramicroscopy* **207** (2019), 112841.
- [6] K. Thomsen, N. Schmidt, A. Bewick, K. Larsen and J. Goulden, *Microscopy and Microanalysis* **19** (2013), p. 724–725.
- [7] G. Nolze, M. Jürgens, J. Olbricht and A. Winkelmann, *Acta Materialia* **159** (2018), p. 408–415.
- [8] A. Winkelmann, C. Trager-Cowan, F. Sweeney, A. P. Day and P. Parbrook, *Ultramicroscopy* **107** (2007), p. 414–421.
- [9] A. Winkelmann, B.M. Jablon, V.S. Tong, C. Trager-Cowan, K.P. Mingard, *Journal of Microscopy* **277** (2020), p. 79–92.
- [10] <https://mtex-toolbox.github.io/>
- [11] <https://github.com/EMsoft-org/EMsoft>
- [12] <http://www.atex-software.eu/>
- [13] <https://kikuchipy.org/>
- [14] <https://github.com/benjaminbritton/AstroEBSD/>
- [15] <https://www.calm-ebsd.com/>

WŁASNOŚCI WYTWARZANEGO PRZYROSTOWO STOPU Fe-10Ni PROPERTIES OF THE ADDITIVELY MANUFACTURED Fe-10Ni ALLOY

Dziurka R.^{1*}, Pasiowiec H.¹, Polkowski W.², Dubiel B.¹, Kruk A.¹, Lech S.^{1,3}

¹ AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków, Polska

² Sieć Badawcza Łukasiewicz, Krakowski Instytut Technologiczny, Kraków, Polska

³ Johns Hopkins University, Whiting School of Engineering, Baltimore, USA

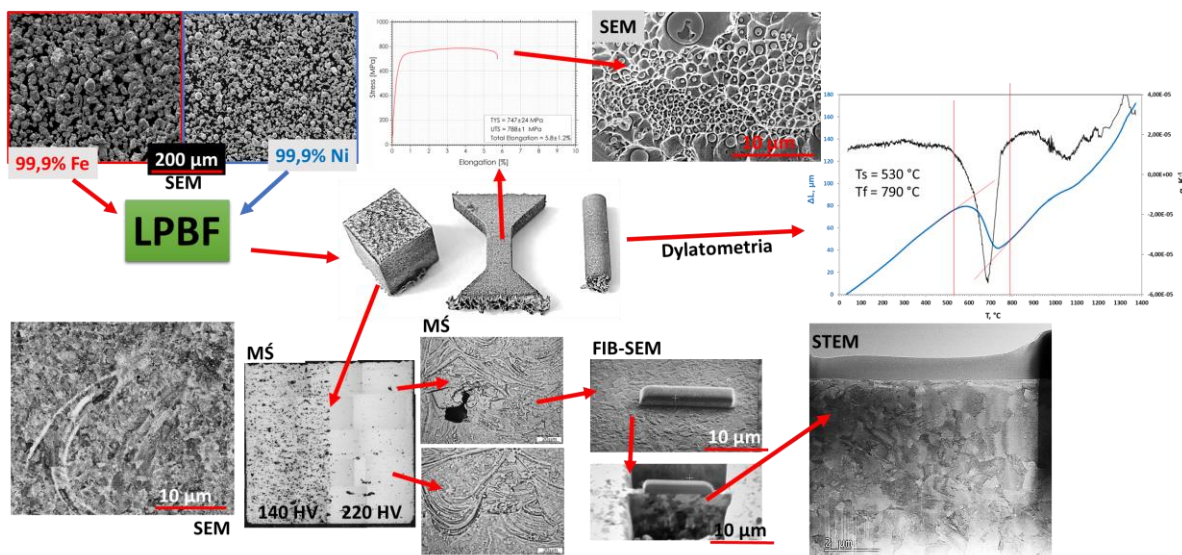
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: dziurka@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Zarówno żelazo jak i nikiel ze względu na ich szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu są bardzo ważnymi pierwiastkami. Wynika to z faktu, że stanowią podstawę materiałów konstrukcyjnych od tych stosowanych na konwencjonalne konstrukcje lądowe w zastosowaniach niskotemperaturowych, aż po materiały wysokotemperaturowe stosowane w energetyce i lotnictwie. O ile technologie wytwarzania i łączenia materiałów na bazie Fe i Ni są dobrze znane, to rozwój nowoczesnych technologii wytwarzania przyrostowego wymaga badań podstawowych i opracowania nowych stopów z układu Fe-Ni dedykowanych do druku 3D [1-5]. Materiał do badań w tej pracy, stop Fe-Ni, został wytworzony z proszków elementarnych, przyrostowo w procesie LPBF na drukarce AYAS 120 LM. Urządzenie to wyposażone jest w moduł z laserem jednomodowy Nd:YAG o maksymalnej mocy 200 W i średnicy plamki roboczej lasera równej 35 μm . Wykonanie mieszaniny proszków elementarnych Fe i Ni w założonych proporcjach zostało wykonane w mikserze wytrząsającym 3D TURBULA. Wytworzone przyrostowo materiały zostały scharakteryzowane za pomocą pomiarów twardości, jednoosiowej próby rozciągania, badań dylatometrycznych oraz obserwacji z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej.

2. Najważniejsze wyniki

Prezentowane rezultaty mają charakter badań podstawowych i skupiają się na charakteryzacji stopu Fe10Ni, stanowiącego bazę do późniejszych modyfikacji. Wybrane wyniki i schemat wykonywania badań zamieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat badań wykonanych celem określenia jakości wydruków LPBF ze stopu Fe10Ni

3. Dyskusja i wnioski

Zastosowanie zoptymalizowanych parametrów procesu LPBF z dodatkowym przetopem (ang. remelt) pozwoliło na uzyskanie stopu Fe-Ni o ciągłej strukturze i niskiej porowatości oraz bardzo drobnym ziarnie. Ponadto podczas tak przeprowadzonego procesu stopy charakteryzowały się dużą ilością nanometrycznych tlenków. Tlen w procesach przyrostowych pochodzi m.in z atmosfery podczas druku i utlenionego proszku. Dzięki takiej mikrostrukturze badane wydruki charakteryzowały się wysokimi własnościami wytrzymałościami co stanowi bardzo obiecujący punkt wyjściowy do kolejnych modyfikacji składu chemicznego stopów z układu Fe-Ni.

4. Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2022/06/X/ST5/01573 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki. Część badań została zrealizowana w ramach działalności statutowej AGH nr. 16.16.110.663.

5. Literatura

- [1] DebRoy T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., Zhang, W.: Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* 2018, 92, s. 112- 224.
- [2] Sames, W. J., List, F., Pannala, S., Dehoff, R. R., Babu, S. S.: The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews* 2016, 61(5), s. 315-360.
- [3] Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., and Newkirk, J.: 13 - Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, ed., Woodhead Publishing 2017, s. 351-371.
- [4] Dowling, L., Kennedy, J., O'Shaughnessy, S., and Trimble, D.: A review of critical repeatability and reproducibility issues in powder bed fusion. *Materials & Design*, 2020, 186, s. 108346.
- [5] Seede, R., Shoukr, D., Zhang, B., Whitt, A., Gibbons, S., Flater, P., Elwany, A., Arroyave, R., and Karaman, I.: An ultra-high strength martensitic steel fabricated using selective laser melting additive manufacturing: Densification, microstructure, and mechanical properties. *Acta Materialia* 2020, 186, s. 199-214.

DRUKOWALNOŚĆ STALI NARZĘDZIOWYCH – WPLYW DODATKÓW STOPOWYCH NA PRZYKŁADZIE WANADU

PRINTABILITY OF TOOL STEELS - THE INFLUENCE OF ALLOYING ADDITIONS ON THE EXAMPLE OF VANADIUM

Fryzowicz K.^{1,2,*}, Bardo R.^{1,2}, Dziurka R.¹, Bała P.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

² Progresja S.A., Żelazna 9, 41-851 Katowice

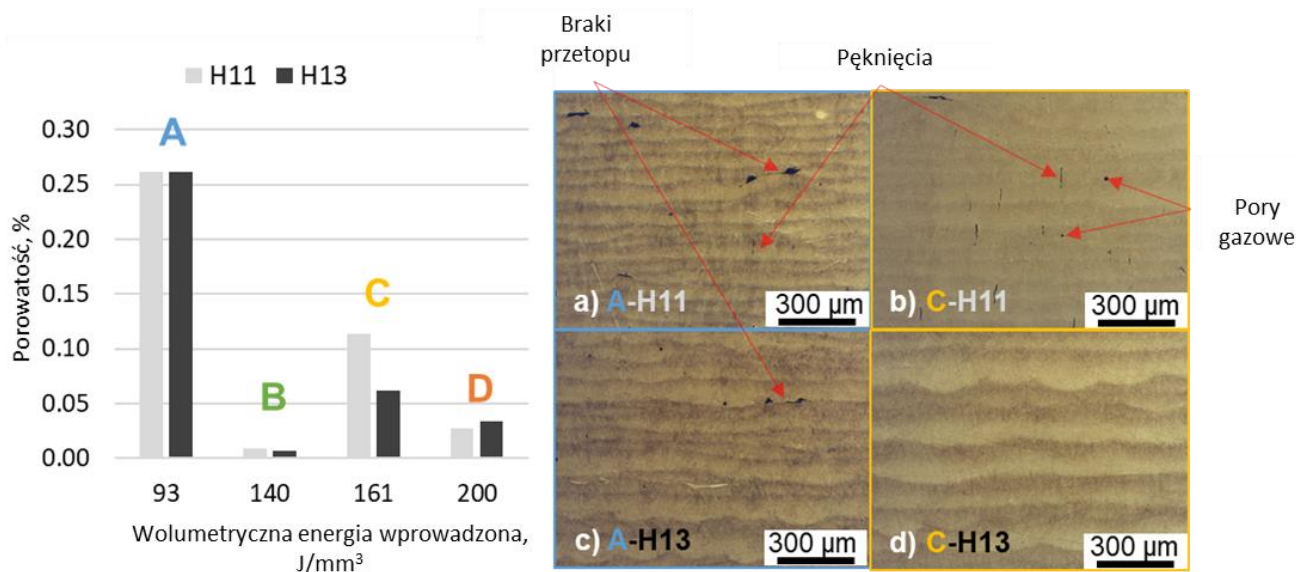
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: fryzowicz@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Stal narzędziowa jest kluczowym materiałem w przemyśle służącym głównie do produkcji narzędzi, często posiadających skomplikowane kształty i wymagających mało-seryjnej produkcji. Z tego względu, konwencjonalna produkcja narzędzi staje się nieefektywna dla takiego zastosowania, a jej miejsce co raz częściej zajmują technologie przyrostowe. Tym bardziej iż pozwalają one na implementację wewnętrznych kanałów chłodzących (np. w matrycy do odlewania), które znacząco poprawiają chłodzenie narzędzia, podnosząc tym samym jego żywotność. Stale narzędziowe są materiałami dostosowanymi do wymogów przemysłu narzędziowego, który oczekuje od nich wysokiej wytrzymałości i twardości, a w przypadku narzędzi pracujących w podwyższonych temperaturach także żarowytrzymałości, żaroodporności i ciągliwości. Stale narzędziowe spełniają te wymagania w dużej mierze dzięki składowi chemicznemu, który jest dostosowywany w zależności od zastosowania narzędzia. Jednak w przypadku wytwarzania przyrostowego, skład chemiczny stali narzędziowej znacząco wpływa na tzw. drukowalność, a więc zdolność materiału do wytwarzania przyrostowego elementu o akceptowalnej jakości, ocenianej niską porowatością i niską ilością (lub brakiem) pęknięć o akceptowalnej długości. Aby głębiej zrozumieć mechanizmy zmiany drukowalności stali w zależności od składu chemicznego, niniejsza praca przedstawia wyniki badań nad drukowalnością stali H11(WCL) oraz H13(WCLV), różniących się co do zasady zawartością Wanadu. Badania przeprowadzono na wytworzonych przyrostowo próbkach i oparto na obserwacjach mikrostruktury z użyciem mikroskopii świetlnej oraz Skaningowej Mikroskopii Elektronowej (SEM). Badania uzupełniono także o analizę składu chemicznego, wykonaną metodą Dyfrakcji Rentgenowskiej (XRD) oraz wykonano badania twardości.

2. Najważniejsze wyniki

W tej sekcji należy przedstawić najważniejsze wyniki badań.



Rys. 1. Wyniki porównawcze badań mikroskopowych ujawniające ewidentne różnice w jakości uzyskiwanych wydruków pomiędzy stalami H11 (rys. a i b) oraz H13 (rys. c i d).

2. Dyskusja i wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować o znacząco pozytywnym wpływie Wanadu na drukowalność stali. Jak pokazały badania, Wanad, poprzez jego zdolność do tworzenia węglików stopowych, zmienia warunki krystalizacji materiału poddawanego cyklicznym i gwałtownym cyklom cieplnym występującym w technologii druku 3D. Tworzenie się węglików stopowych w krystalizującym materiale wpływało najprawdopodobniej na zarodkowanie heterogeniczne pierwotnych ziaren austenitu, co pozwoliło na zmniejszenie dezorientacji sąsiadujących ze sobą ziaren. Dzięki temu, podczas cykli cieplnych powodujących dyatację drukowanego materiału, zapobiegało powstawaniu pęknięć na granicy tych ziaren, które z kolei obserwowano w stali H11 (WCL). Wyniki jasno pokazują, że dodatki stopowe, takie jak Wanad, znacząco wpływają na zachowanie się materiału w technologii druku 3D, co ma istotne konotacje związane z projektowaniem i wyborem stopów do zastosowania w technologiach przyrostowych.

3. Podziękowania

Praca dofinansowana z MEiN w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy realizowanego w porozumieniu z przedsiębiorstwem Progresja S.A. i Progresja New Materials zajmującym się wdrażaniem technologii druku 3D w różnych gałęziach przemysłu.

STEROWANIE STRUKTURĄ CIENKICH POWŁOK AZOTKU CYNKU-CYNY METODĄ REAKTYWNEGO HiPIMS WSPOMAGANĄ PLAZMĄ MIKROFALOWĄ

TAILORING THE STRUCTURE OF ZINC TIN NITRIDE THIN FILMS VIA MICROWAVE PLASMA- ASSISTED REACTIVE HiPIMS

Hain C.^{1,2,3,*}, Wiczerzak K.¹, Casari D.¹, Sharma A.¹, Michler J.¹, Hessler-Wyser A.³, Nelis T.^{1,2}

¹Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Feuerwerkerstrasse 39, 3602 Thun, Switzerland

²Bern University of Applied Sciences, Quellgasse 21, 2502 Biel/Bienne, Switzerland

³EPFL, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Rue de la Maladière 71b, 2000 Neuchâtel, Switzerland

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: caroline.hain@empa.ch

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Istnieje znaczne zapotrzebowanie na uzyskanie większej kontroli nad procesami rozpylania cienkich warstw w celu uzyskania odpowiedniej struktury, właściwości i ogólnej jakości osadzonego materiału na potrzeby konkretnych zastosowań. Kluczem do wykorzystania tego potencjału jest zjawisko fenomenologicznego rozłączenia, tj. oddzielenia od siebie wzajemnie zależnych oddziaływań. W niniejszej pracy jako materiał do badań wybrano azotek cynku-cyny (ZTN), półprzewodnik należący do grupy Zn-IV-N₂. Do osadzenia serii cienkich powłok ZTN wykorzystano wspomaganą plazmą mikrofalową rozpylanie magnetronowe o wysokiej mocy (ang. *microwave plasma-assisted high power impulse magnetron sputtering*, MAR-HiPIMS), gdzie modyfikowano moc mikrofal oraz przyłożone napięcia przy substracie. Środowisko osadzania zostało poddane analizie przy użyciu krzywych HiPIMS $I(V,t)$ i spektrometrii masowej czasu przelotu (ang. *time-of-flight mass spectrometry*, ToF-MS). Strukturę warstwy scharakteryzowano za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), a także skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej (SEM/TEM).

2. Najważniejsze wyniki

Wyniki pomiarów środowiska osadzania *in situ* pokazują, że plazma mikrofalowa umożliwiła wytwarzanie jonów molekularnych związków azotu w fazie gazowej. Dodatkowo, plazma mikrofalowa pozwoliła na post-jonizację rozpylonych atomów i ogólną redukcję zakresu energii na ładunek (E/Q) przychodzących naładowanych cząstek. Zmieniając moc mikrofal i odchylenie podłoża, uzyskano różne struktury cienkich warstw dla tego samego składu chemicznego.

3. Dyskusja i wnioski

Jony azotkowe generowane przez plazmę mikrofalową w fazie gazowej znacznie ułatwiły osadzanie stechiometrycznych powłok ZTN. Nie zaobserwowano tworzenia się tego typu jonów w przypadku konwencjonalnego R-HiPIMS, gdzie w zlokalizowanej plazmie magnetronowej nie zostaje wygenerowana wystarczająca ilość reaktywnych form azotu. Dzięki możliwości zmniejszenia zakresu E/Q przychodzących naładowanych cząstek możliwe było uzyskanie kontroli nad strukturą warstw, która obejmowała zakres od polikrystalicznej do preferencyjnie teksturowanej.

4. Podziękowania

Praca wspomagana infrastrukturą badawczą BFH, Empa oraz TOFWERK AG.

5. Literatura

- [1] C. Hain, P. Schweizer, P. Sturm, A. Borzi, J.E. Thomet, J. Michler, A. Hessler-Wyser, T. Nelis, Microwave plasma-assisted reactive HiPIMS of InN films: Plasma environment and material characterisation, *Surf Coat Technol.* 454 (2023) 129188. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129188>.
- [2] G.Y. Yushkov, A. Anders, Origin of the delayed current onset in high-power impulse magnetron sputtering, in: *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010: pp. 3028–3034. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2063041>.
- [3] A.N. Fioretti, A. Zakutayev, H. Moutinho, C. Melamed, J.D. Perkins, A.G. Norman, M. Al-Jassim, E.S. Toberer, A.C. Tamboli, Combinatorial insights into doping control and transport properties of zinc tin nitride, *J Mater Chem C Mater.* 3 (2015) 11017–11028. <https://doi.org/10.1039/C5TC02663F>.
- [4] D. Depla, S. Mahieu, R. De Gryse, Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties, *Thin Solid Films.* 517 (2009) 2825–2839. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.108>.
- [5] L. Latrasse, M. Radoiu, T. Nelis, O. Antonin, Self-matching plasma sources using 2.45 GHz solid-state generators: microwave design and operating performance, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy.* 51 (2017) 237–258. <https://doi.org/10.1080/08327823.2017.1388338>.

ANALIZA PARAMETRÓW WALCOWANIA NA GORĄCO STALI MIKROSTOPOWYCH ORAZ ICH WPŁYW NA WŁASNOŚCI I MIKOSTRUKTURĘ

THE ANALYSIS OF HOT ROLLING PARAMETERS OF MICROALLOYED STEELS AND THEIR EFFECT ON PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE

Hamryszczak T.^{1,2,*}, Śleboda T.¹, Korpala G.³

¹ AGH Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Krakowie, ul. T. Sendzimir 1, 31-752 Kraków

³ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Metallformung, Bernhard-von-Cotta-Str. 4, 09599 Freiberg

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: tomasz.hamryszczak@agh.edu.pl

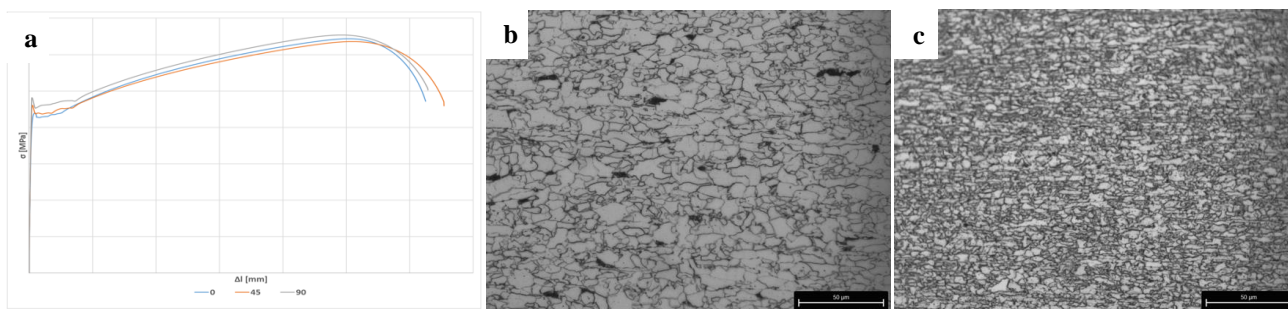
1. Wprowadzenie i metodyka badań

Stale mikrostopowe dzięki swoim unikalnym własnościom pozwalającym na wyraźne zmniejszenie masy konstrukcji oraz poprawę własności użytkowych znalazły szerokie zastosowanie w nowoczesnych konstrukcjach [1-5]. Jedynym miejsce w Polsce, gdzie można produkować blachy stali HSLA jest Walcownia Gorąca ArcelorMittal Poland S.A. w Krakowie.

W niniejszej pracy, która stanowiła część badań wstępnych realizowanych w ramach doktoratu wdrożeniowego, dokonano wstępnej analizy całego procesu produkcji na bazie dwóch wybranych gatunków stali HSLA. Przebadano materiał wsadowy, dokonując analizy składu chemicznego oraz wykonując makro- i mikrostruktury badanych materiałów. Dla każdej z analizowanych stali pobrano również materiał po walcowaniu wstępnym oraz kontrolowanym chłodzeniu – z materiału gotowego. Wykonano badania mikrostruktur materiału oraz podstawowe badania mechaniczne – próby rozciągania oraz udarności w niskich temperaturach. Otrzymane wyniki przedyskutowano.

2. Najważniejsze wyniki

Analizowane stale posiadają dobrą, niską anizotropię własności mechanicznych, oczekiwaną drobnoziarnistą mikrostrukturę, co pokazano częściowo na rysunku 1. Cechują się również wysoką odpornością na pękanie, również w niskich temperaturach – zarówno w temperaturze -20°C jak i -40°C co wykazały przeprowadzone badania.



Rys. 1. Krzywa rozciągania dla stali S1 (a) – widoczna niska anizotropia własności – oraz reprezentatywne mikrostruktury stali S1 (b) oraz stali S2 (c) – w obu przypadkach widoczna oczekiwana drobnoziarnista mikrostruktura.

3. Dyskusja i wnioski

Badania pozwoliły na określenie aktualnego stanu procesu walcowania stali HSLA w Krakowskiej Walcowni Gorącej. Badania stanowią dobrą podstawę do dalszej pracy w ramach doktoratu. Do najważniejszych wniosków płynących z niniejszej pracy należą:

1. Oba analizowane gatunki cechują się niską anizotropią własności. Wykonane próby rozciągania próbek wyciętych zgodnie z kierunkiem walcowania, poprzecznie do kierunku walcowania oraz pod kątem 45° wykazały jasno, że materiał nadaje się do dalszych procesów kształtowania w tym procesów tłoczenia, co przy niskiej zawartości węgla i świetnej spawalności daje bardzo dobry materiał konstrukcyjny.
2. W obu analizowanych stalach otrzymano oczekiwaną, drobnoziarnistą mikrostrukturę. Nie widać segregacji pierwiastków, ani pasmowości. Widać wyraźny wpływ pierwiastków stopowych – stal S2 o wyższej zawartości Ti niż stal S1 posiada wyraźnie drobniejszą mikrostrukturę a co za tym idzie wyższe własności wytrzymałościowe.

4. Podziękowania

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach VI edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”.

5. Literatura

- [1] Villalobos Julio, Adrian Del-Pozo, Bernardo Campillo, Jan Mayen, and Sergio Serna. (2018). Microalloyed Steels through History until 2018: Review of Chemical Composition, Processing and Hydrogen Service. *Metals* 8, no. 5: 351.
- [2] Kurpe Oleksandr, Kukhar Volodymyr, Klimov Eduard, Prysiazhnyi Andriy. (2019). Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700. *Solid State Phenomena* 291, 63-71.
- [3] Ariati, M., Manaf, A., Siradj, E. (2012). Effect of Cooling Rate and Nb Composition on Non-Isothermal Austenite Grain Growth Kinetics in Nb-HSLA Steel during Hot Rolling. *Advanced Materials Research*, vols. 479–481, pp. 414–420.
- [4] Jacolot Ronan, Huin Didier Marmulev, Mathey Eliette. (2014). Hot Rolled Coil Property Heterogeneities due to Coil Cooling: Impact and Prediction. *Key Engineering Materials*, 622-623.
- [5] Carretero Olalla, V., Petrov, R. H., Thibaux, P., Liebeherr, M., Gurla, P., Kestens, L. (2012). Influence of Rolling Temperature and Cooling Rate on Microstructure and Properties of Pipeline Steel Grades. *Materials Science Forum*, vols. 706–709, pp. 2710–2715.

ANALIZA ZMIAN NAPIĘCIA W PROCESIE OBRÓBKI ELEKTROEROZYJNEJ Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW TRANSFORMACJI FALKOWEJ

ANALYSIS OF VOLTAGE CHANGES IN THE EDM PROCESS WITH THE USE OF WAVELET TRANSFORMATION ELEMENTS

Jążdżewski T.^{1*}, Regulski K.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: tjazdzewski@agh.edu.pl

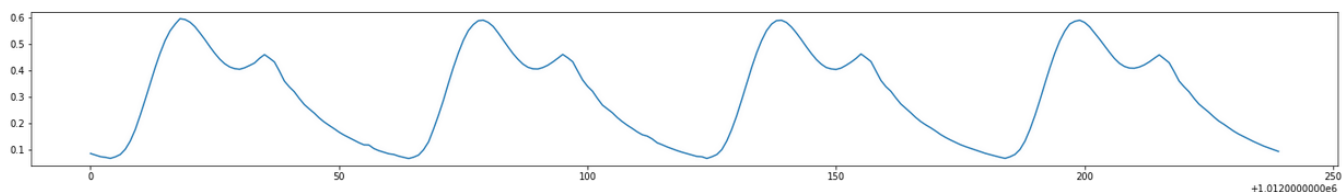
1. Wprowadzenie i metodyka badań

Badania miały na celu sprawdzeni anomalii w pomiarach napięcia i natężenia prądu w celu wykrycia anomalii powiązanych z momentem przebijania materiału [1]. W tym celu wykonano próbne odwierty i zmierzono napięcie i natężenie dla każdego odwiertu z częstotliwością miliona próbek na sekundę.

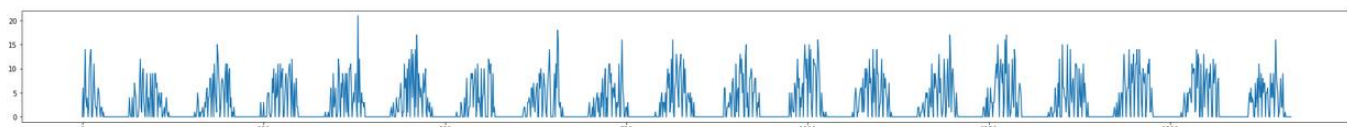
Analiza danych została oparta o transformacje falkową[2], która to wykorzystuje nowo utworzoną falkę (charakterystyczną dla samego procesu elektroerozji). Na bazie tej falki analizowane jest odchylenie aktualnych parametrów wykresu napięcia / natężenia z wykresem referencyjnym. W odróżnieniu od tranfomraty fouriera, pozwala ona na analizowanie zmiany konkretnej częstotliwości w czasie.

Sama tematyka ma na celu przedstawienie metodyki związanej z tworzeniem falki spełniającej niezbędne kryteria [3], jak i sposobu prezentacji danych związanych z zmianą podobieństwa w czasie, które mogą ukazać charakterystyczne zmiany.

2. Najważniejsze wyniki



Rys. 1. Wyizolowanie charakterystycznego wykresu dla procesu elektroerozji



Rys. 2 Wyizolowanie momentów podobnych do funkcji referencyjnej

(1)

3. Dyskusja i wnioski

Powyższa metoda pozwala na znaczą redukcje wymiaru analizowanej próbki, dzięki czemu nie jest wymagane analizowanie 5 mln punktów, a tylko kilka tysięcy. Dodatkowo metoda ta umożliwia wyszukiwanie anomalii poprzez wyizolowanie interesujących nas częstotliwości. Co za tym idzie w przypadku dobrego opomiarowania, może być na bieżąco monitorowany poprawny przebieg procesu według założeń teoretycznych.

4. Literatura

1. Geng T., Xu Z., Zhang Ch., Ning J., Breakthrough detection in electro-chemical discharge drilling to enhance machining stability, Chinese Journal of Aeronautics, 2022, DOI: 10.1016/j.cja.2022.09.023.
2. Thill, Markus & Konen, Wolfgang & Bäck, Thomas. (2019). Time Series Anomaly Detection with Discrete Wavelet Transforms and Maximum Likelihood Estimation.
3. M.-C. Huang, Wave parameters and functions in wavelet analysis, Ocean Engineering, Volume 31, Issue 1, 2004, Pages 111-125, ISSN 0029-8018, [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(03\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00047-7).

ANALIZA PRZYCZYŃ PĘKNIĘĆ TARCZY FELGI SAMOCHODOWEJ WYKONANEJ ZE STALI DP600

A STUDY OF DP600 STEEL CRACKING MECHANISM DURING STAMPING OF WHEEL DISCS

Kaźmierski T.^{1,2,*}, Krawczyk J.³, Frocisz Ł.³, Kokosza A.³, Piątek M.⁴

¹ ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Krakowie ul. Tadeusza Sendzimira 1, 31-752 Kraków, Polska

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Szkoła Doktorska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

³ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

⁴ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

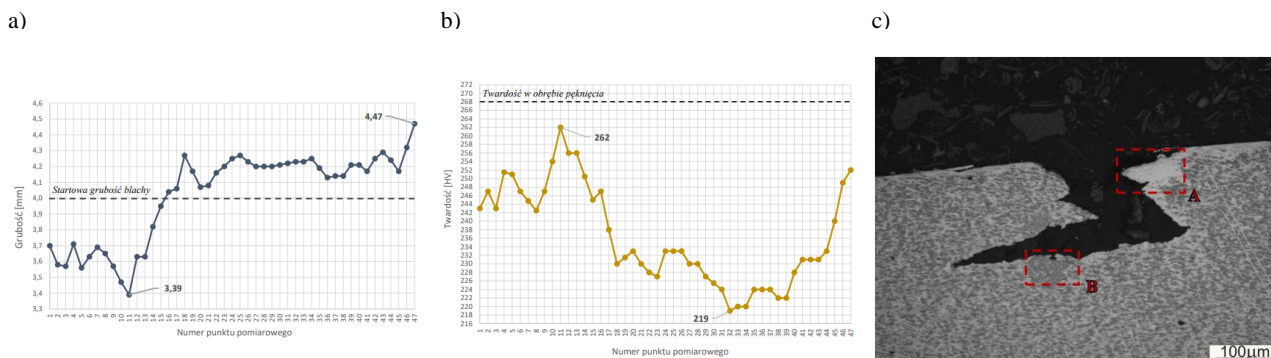
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: tomasz.kaźmierski@arcelormittal.com

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Stal DP600 znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie wykorzystywana jest m.in. do produkcji dysków felg samochodowych [1]. O wyborze właśnie tego rodzaju stali do tak wymagającego zastosowania decydują jej własności mechaniczne, wśród których na największą uwagę zasługuje wysoka wytrzymałość na rozciąganie połączona z dobrą plastycznością, a także brak wyraźnej granicy plastyczności oraz niski stosunek Re/Rm. Z uwagi na coraz wyższe wymagania w zakresie zmniejszenia zużycia paliwa przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pasażerów, do produkcji tarcz felg samochodowych stosuje się coraz cieńsze blachy, natomiast same tarcze charakteryzują się coraz bardziej skomplikowanymi kształtami. Sprawia to, że pomimo spełnienia podstawowych wymagań dotyczących plastyczności (takich jak wydłużenie mierzone w próbie rozciągania), stal DP600 ulega czasami pękaniu w trakcie procesu tłoczenia tarcz felg [2, 3]. Prezentowane badania mają na celu zidentyfikowanie mechanizmu tworzenia się pęknięć materiału w procesie produkcji gotowego wyrobu w odniesieniu do jego podatności do kształtowania na zimno oraz stanu naprężeń powierzchniowych występujących w gotowym wyrobie.

2. Najważniejsze wyniki

Przeprowadzono wieloaspektowe badania tarczy felgi z widocznymi pęknięciami powstałymi w procesie tłoczenia. Z uwagi na powierzchniowy charakter pęknięcia, istotne było określenie poziomu naprężeń powierzchniowych w materiale. Szczegółowej analizie mikrostrukturalnej poddano wycięte z gotowej felgi miejsca pęknięć. Wykonano również pomiary grubości oraz twardości wzdłuż promienia tarczy.



Rys. 84. Obraz mikrostruktury obszaru mniejszego pęknięcia znajdującego się na tarczy felgi

Rys. 1. a) zmiana grubości blachy wzdłuż promienia tarczy felgi, b) zmiana twardości wzdłuż promienia tarczy felgi, c) obraz mikrostruktury pęknięcia z widocznym karbem strukturalnym

3. Dyskusja i wnioski

Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie przyczyny pęknięcia materiału, jak również dostarczyły istotnych z punktu widzenia projektowania procesu tłoczenia informacji na temat rozkładu naprężeń powierzchniowych oraz występującego lokalnego pocienienia i związanego z nim umocnienia materiału. Analiza rozkładu naprężeń oraz lokalnych zmian grubości pozwala na określenie miejsc najbardziej narażonych na pęknięcie. Zaproponowane wyjaśnienie mechanizmu pęknięcia wskazuje na występowanie karbu strukturalnego widocznego w warstwie przypowierzchniowej materiału, wynikającego z lokalnej segregacji faz ferrytu i martenzytu. Obszary takie stanowią miejsce ułatwionej dekohezji na granicy rozdziału obu faz. O ile samo zjawisko dekohezji na grancy faz jest w literaturze dotyczącej stali DP dobrze opisane, o tyle rola karbu w warstwie przypowierzchniowej i jego znaczenie w tworzeniu się płytkich pęknięć propagujących w głąb materiału są dotychczas niedostatecznie zbadane.

4. Podziękowania

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach V edycji doktoratów wdrożeniowych.

5. Literatura

- [1] Bimal Dasa, Surajit Kumar Paula, Akhilendra Singha et al., The effect of thickness variation and pre-strain on the cornering fatigue life prediction of a DP600 steel wheel disc, "International Journal of Fatigue" 2020, issue 139, 105799.
- [2] Carlos R.M. Silva, F.J.G. Silva, Ronny M. Gouveia, Investigations on the edge crack defect in Dual Phase steel stamping process, "Procedia Manufacturing" 2018, issue 17, pp 737-745.
- [3] Niloufar Habibi, Santhosh Mathi, Thorsten Beier et al., Effects of Microstructural Properties on Damage Evolution and Edge Crack Sensitivity of DP1000 Steels, "Crystals" 2022, Vol. 12, 845.

NIEORGANICZNE SYSTEMY SPOIW: DROGĄ DO REDUKCJI EMISJI W ODLEWNIACH INORGANIC BINDER SYSTEMS (IOBs): THE WAY TO REDUCTION EMISSIONS IN FOUNDRY

Kmita A.^{1,*}, Dańko R.^{2,*}, Holtzer M.², Dańko J.², Drożyński D.², Skrzyński M.², Rocznik A.²,
Gruszka D.², Jakubski J.²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii,
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Odlewnictwa, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: akmita@agh.edu.pl, rd@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie

Europejski przemysł odlewniczy stopów żelaza jest trzecim co do wielkości na świecie, po Chinach i Indiach, i odpowiada za 15% światowej produkcji. Przemysł odlewniczy należy do grup branż wysoce energochłonnych. W 2020 r. europejski sektor odlewnictwa stopów żelaza składał się z 1652 odlewni, które wyprodukowały 9,1 mln ton odlewów. W kolejnych latach miał miejsce spadek produkcji, co było wynikiem kryzysu spowodowanego wirusem Covid. Przewiduje się, że poziom roku 2020 zostanie osiągnięty w 2023. Obecnie europejskie odlewnie głównie do produkcji form i rdzeni wykorzystują masy z bentonitem (*ang. green sand*) oraz masy ze spoiwami organicznymi (np. no-bake). Tylko 1% odlewni w Europie, wykorzystuje technologie oparte na nieorganicznych systemach spoiw [1-2]. Główną przyczyną zaistniałej sytuacji są ograniczenia technologiczne. Przy wyborze technologii produkcji form i rdzeni należy uwzględnić następujące elementy: wydajność, jakość odlewu oraz wpływ na środowisko i warunki pracy, co w konsekwencji decyduje o kosztach [1-2]. Zaletami technologii wykorzystujących spoiwa organiczne są: mały dodatek żywicy, duża reaktywność i mała lepkość spoiwa, duża wytrzymałość i dobra regenerowalność mas [2]. Ich wadą jest emisja licznych związków, w tym szkodliwych (np. formaldehyd, fenol, benzen i ich pochodne oraz związki siarki), generowanych podczas zalewania ciekłym stopem odlewniczym, chłodzenia i wybijania form. Poza tym wysoka cena alkoholu furfurylowego (monopol Chin), krótka żywotność masy, zawartość azotu w żywicach furfurylowych (niekorzystna dla odlewów staliwnych) stanowią ograniczenia w stosowaniu tych mas. Nieorganiczne systemy spoiw (*ang. Inorganic Binder Systems IOBs*) są już dobrze znane w odlewnictwie stopów aluminium. Wykazano, że znacząco przyczyniają się do zmniejszenia emisji niebezpiecznych związków i poprawy warunków pracy w porównaniu z organicznymi systemami spoiw [2]. Ponadto zastąpienie spoiw organicznych spoiwami nieorganicznymi rozszerza możliwość zagospodarowania zużytych mas a tym samym zmniejsza się ilość odpadów co jest zgodne z polityką GOZ (gospodarka o obiegu zamkniętym) (*ang. circular economy*). **Wprowadzanie spoiw nieorganicznych w przemyśle odlewniczym jest zgodne ze strategią zrównoważonego rozwoju (*ang. Sustainable Development*) i korzystnie wpłynie na rozwój tej gałęzi przemysłu.** Oznacza to konieczność uwzględnienia w podejmowaniu decyzji strategicznych i działalności produkcyjnej wzajemnych zależności pomiędzy środowiskiem a aspektami społeczno-ekonomicznymi [1-3].

2. Dyskusja

W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w ramach europejskiego projektu **GREEN CASTING LIFE** (LIFE21 ENV/FI/074439) [4], który jest inicjatywą mającą na celu ocenę możliwości uzyskania korzyści wynikających ze stosowania nieorganicznych systemów wiążących w europejskich odlewniach stopów żelaza. Projekt GREEN CASTING LIFE ma na celu poprawę stanu środowiska i warunków pracy w europejskich odlewniach stopów żelaza przez wprowadzenie czystszych i ekologicznych metod produkcji, wykorzystujących innowacyjne spoiwa nieorganiczne. W skład Konsorcjum GREEN CASTING LIFE wchodzi 16 partnerów z europejskich krajów (takich jak np. Hiszpanii, Francji, Czech, Włoch, Niemiec, Finlandii czy Polski) w tym 6 flagowych odlewni [4]. Prace prowadzone w ramach projektu GREEN CASTING LIFE, pozwolą na **wdrożenie i walidację** na poziomie przemysłowym zastosowania nieorganicznych układów spoiw do produkcji form i rdzeni w odlewniach stopów żelaza osiągając poziom gotowości technologicznej TRL8 (*ang. Technology Readiness Level*) [4]. Ponadto uzyskana nowa wiedza zostanie wykorzystana przy aktualizacji Dokumentów Referencyjnych dotyczących Najlepszych Dostępnych Technik (*ang. Best Available Techniques*) dla Kuźni i Odlewni (dokument BREF).

3. Podziękowania

Badania finansowane w ramach projektu GREEN CASTING LIFE.

Projekt GREEN CASTING LIFE jest współfinansowany przez program Unii Europejskiej LIFE w ramach umowy LIFE21-ENV-FI-101074439. Wyrażone poglądy i opinie są wyłącznie poglądami autora (autorów) i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy Unii Europejskiej lub CINEA. Zatem Unia Europejska, ani organ przyznający środki nie mogą ponosić za nie odpowiedzialności.



Projekt GREEN CASTING LIFE (LIFE21-ENV-FI-101074439) jest współfinansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) w ramach umowy 276/2023/Wn-06/OZ-PO-LF/D.

Literatura

- [1] European Commission, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry Draft 1 (February 2022).
- [2] Holtzer M., Kmita A. *Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development*, Springer Nature Switzerland AG (2020).
- [3] Holtzer M., Dańko R., Piasny S., Kubecki M., Drożyński D., Rocznik A., Skrzyński M., Kmita A. Research on the release of dangerous compounds from the BTEX and casting conditions. *Materials*, 14 (2021), p. 2581.
- [4] <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/details/101074439>

BADANIA STOPÓW WYSOKOENTROPOWYCH WYTWARZANYCH TECHNOLOGIĄ METALURGII PROSZKÓW EXAMINING HIGH ENTROPY ALLOYS PRODUCED VIA POWDER METALLURGY

Kopec-Surzyn A.^{1,*}, Madej M.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: kopecsurzyn@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

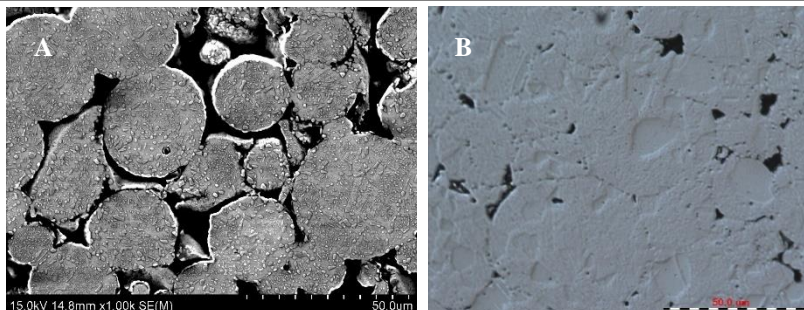
Stopy wysokoentropowe zawierają w swoim składzie chemicznym co najmniej pięć pierwiastków w stosunkach zbliżonych do równomolowych, co gwarantuje im wysoką entropię mieszania. Atomy każdego ze składników mogą obsadzić każdy z węzłów sieci, co doprowadza do jej zniekształcenia, a w konsekwencji wpływa korzystnie na własności. Celem badań jest analiza możliwości wytwarzania tych stopów na przykładzie stopu Co-Cr-Fe-Mn-Ni, zwanego również stopem Cantora, technologiami związanymi z metalurgią proszków. Stop ten cechuje się wysoką plastycznością, odpornością na pękanie, która dodatkowo wzrasta wraz z obniżeniem temperatury, a jego własności mogą być w szerokim zakresie kształtowane w zależności od metody wytwarzania i przeprowadzonej obróbki cieplnej. Technologia metalurgii proszków umożliwia wytwarzanie elementów ze składników o zróżnicowanej gęstości i temperaturze topnienia oraz daje możliwości kształtowania własności poprzez sterowanie parametrami procesu.

Materiałem do badań jest proszek stopowy zawierający Co-Cr-Fe-Mn-Ni w zbliżonych do równomolowych proporcjach wytworzony metodą rozpylania. Podjęto próbę wytworzenia materiału spiekane go na drodze klasycznej metalurgii proszków. Proszek został wymieszany z 1% mas. gliceryny w celu poprawy zgęszczalności i formowalności, po czym został poddany jednoosiowemu, jednostronnemu prasowaniu z różnymi ciśnieniami. Spiekanie przeprowadzono w temperaturach 1100°C oraz 1200°C z zastosowaniem dwóch różnych atmosfer: azotu oraz wodoru. Drugą metodą wytwarzania było spiekanie iskrowo-plazmowe (SPS). Spiekano ten sam proszek w szerokim zakresie temperatur, tak aby określić optymalne warunki wytwarzania badanego stopu, po czym przeprowadzono obserwacje przy użyciu mikroskopu świetlnego, SEM oraz badanie twardości metodą Vickersa stosując obciążenie 1 kGF.

2. Najważniejsze wyniki

W poniższej tabeli zestawiono najważniejsze wyniki dotyczące własności badanego stopu a na rysunku 1 przykładowe mikrostruktury.

	Spiekanie 1100°C, N ₂	Spiekanie 1200°C, N ₂	SPS 875°C	SPS 925°C	SPS 975°C
Gęstość rzeczywista, g/cm ³	5,68	5,84	7,30	7,44	7,67
Twardość, HV 1	196,25	229,00	221,30	271,17	345,70



Rys. 1. Mikrostruktura materiału A – spiekane go w 1200 °C, B - uzyskane go metodą SPS z zastosowaniem temperatury spiekane go 975°C

3. Dyskusja i wnioski

Wykazano, że gęstość i twardość spieków wytworzonych klasyczną metalurgią proszków rośnie wraz ze wzrostem temperatury spiekane go, jednak najwyższą twardość i gęstość uzyskano dla próbek wytwarzanych metoda SPS, zwłaszcza dla temperatury spiekane go wynoszącej 975°C. Można stwierdzić, że prawdopodobnie gliceryna, dodawana w celu ułatwienia procesu prasowania, utrudnia w znacznym stopniu spiekane go stopu Cantora. Natomiast zastosowanie metody SPS, łączącej prasowanie i spiekane go, uzyskano materiał o gęstości zbliżonej do stopu litego. Przedstawione wyniki mają charakter badań wstępnych, będą stanowiły podstawę do dalszych eksperymentów.

4. Literatura

- [1] Cantor B., Chang I. T. H., Knight P., Vincent A. J. B.: Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering A*, vol. 375–377, no. 1-2 SPEC. ISS. (2004), pp. 213–218, doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
- [2] Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y.: Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Adv Eng Mater*, vol. 6, no. 5 (2004), p. 299–303, doi: 10.1002/ADEM.200300567.
- [3] D. Garbiec D.: Iskrowe spiekane go plazmowe (SPS): teoria i praktyka. *INŻYNIERIA MATERIAŁOWA*, vol. 36 nr 2 (2015), 60-64, doi: 10.15199/28.2015.2.2.
- [4] Gludovatz B., Hohenwarther A., Catoor D., Chang E. H., George E. P., and Ritchie R. O.: A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science* (1979), vol. 345, no. 6201 (2014), p. 1153–1158, doi: 10.1126/science.1254581.

ANALIZY STRUKTURALNE I EKSPLOATACYJNE MATERIAŁÓW METALICZNYCH

STRUCTURAL AND EXPLOITATION ANALYSES OF METALLIC MATERIALS

Krawczyk J.^{1,*}

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

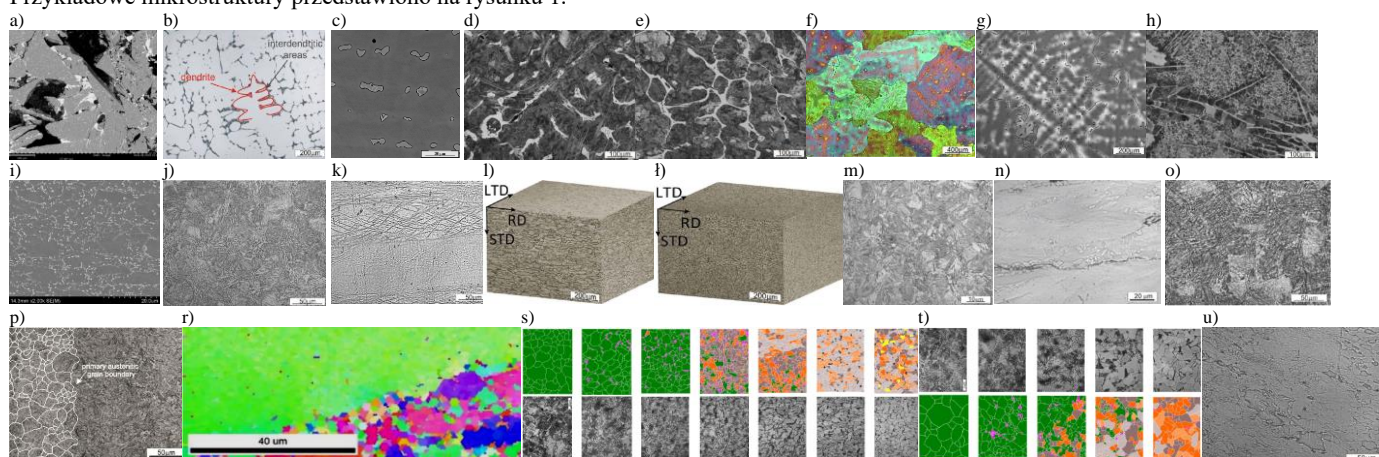
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: jkrawcz@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie

Dla egzemplifikacji problematyki kształtowania struktury oraz właściwości eksploatacyjnych analizą objęto materiały metaliczne w tym stopy miedzi, tytanu, niklu, kobaltu a szczególnie stopy żelaza (stale i staliwa) [1-15]. Których struktura była kształtowana w różny sposób: przez prasowanie materiałów sypkich, odlewanie, obróbkę cieplną, przeróbkę plastyczną, obróbkę cieplno-plastyczną, zgrzewanie indukcyjne, spawanie laserowe [1-15]. Oceniano parametry materiałów przez analizę mikrostruktury, pomiary twardości, ocenę własności mechanicznych (wraz z ich anizotropowością), cechy areologiczne i parametry reologiczne [1-15]. Finalnym parametrem ocenianym były własności eksploatacyjne w tym mechanizmy zużycia [1,2,7,12,15].

2. Najważniejsze wyniki

Przykładowe mikrostruktury przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe mikrostruktury badanych materiałów w zależności od sposobu kształtowania: a) materiał brykietowany (brąz ołowiowy) [10], b) materiał odlany (permalloy) [3], c) materiał odlany (heranium P) [2], d) stan odlany bez modyfikacji (staliwo G200CrNiMo5-3-3) [1], e) stan odlany z modyfikacją (staliwo G200CrNiMo5-3-3) [1], f) stan odlany (staliwo wysokomanganowe GX40MnCr12) [15], g) stan odlany (staliwo wysokomanganowe GX110MnCrMo13-4) [12], h) po obróbce cieplnej materiału odlanego (staliwo G200CrNiMo5-3-3) [1], i) po wyżarzaniu zmiękczającym (stal 22MnB5) [9], j) po obróbce cieplnej materiału przerobionego plastycznie (stal 20Cr4/1.7027) [7], k) po przeróbce plastycznej (stop tytanu Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo) [14], l) po przeróbce plastycznej (stal DC05/1.0312) [11], ł) po obróbce cieplno-plastycznej (stal DD14/1.0389) [11], m) po obróbce cieplno-plastycznej (stal 22MnB5) [9], n) po obróbce cieplno-plastycznej (permalloy) [3], o) po obróbce cieplno-plastycznej (stal 4130) [13], p) po obróbce cieplno-plastycznej (stal 4340) [5], r) po obróbce cieplno-plastycznej -EBSD (stop tytanu Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo) [14], s) w obszarze zgrzewu indukcyjnego (stal 12X) [8], t) w obszarze zgrzewu indukcyjnego (stale S235JR) [8], u) w obszarze SWC spoiny laserowej (stale IF) [4]

3. Dyskusja i wnioski

Badania nad zagęszczaniem materiałów sypkich dotyczyły nowego podejścia do oceny struktury i własności brykietów. Wprowadzono koncepcję tzw. diagramów Ashby'ego. Pozwoliło to na uzyskanie nowych spostrzeżeń odnośnie tego procesu. W stopach odlewniczych można łączyć parametry mikrostrukturalne (związane z procesem odlewania, składem chemicznym i obróbką cieplną) z właściwościami tribologicznymi. Kształtowanie mikrostruktury materiałów (zwłaszcza metalicznych) nie można omawiać bez skoncentrowania się na zagadnieniach przeróbki plastycznej. Z tego względu istotną rolę w prowadzonych badaniach odgrywała analiza wpływu parametrów plastycznej przeróbki metali na kształtowanie się mikrostruktury i właściwości materiałów metalicznych w tym zakresu rekryształizacji dynamicznej w kształtowaniu się tzw. okien procesowych. Wpływ odkształcenia plastycznego a zwłaszcza oddziaływania temperatury jest istotny dla kształtowania się mikrostruktury podczas procesów spajania materiałów. W przypadku analizy połączeń zgrzewanych indukcyjnie dwóch stali stwierdzono możliwość wykonania analizy inverse opisującej stan mikrostrukturalny w SWC w trakcie wykonywanego połączenia.

4. Podziękowania

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki, subsydia AGH nr 16.16.110.663.

Literatura

- [1] Krawczyk J. i in., *Archives of Metallurgy and Materials*, 2018, 63, 2, 915–920.
- [2] Augustyn-Nadzieja J. i in., *Tribologia*, 2019, 287, 5, 5–12.
- [3] Łukaszek-Sołek A., i in., *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 797, 174–184.
- [4] Kowalik K. i in., *Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego*, 2019, 36, 61–67.
- [5] Łukaszek-Sołek A. i in., *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8, 3, 3281–3290.
- [6] Bembenek M. i in., *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29, 6, 3792–3799.
- [7] Bembenek M. i in., *Materials*, 2020, 3, 24, 5782.
- [8] Bunsch A. i in., *Advances in Materials Science*, 2021, 21, 4, 19–33.
- [9] Paćko M. i in., *Archives of Metallurgy and Materials*, 2021, 66, 2, 601–608.
- [10] Bembenek M. i in., *Materials*, 2021, 14, 6, 1455.
- [11] Krawczyk J. i in., *Materials*, 2021, 14, 13, 3540.
- [12] Krawczyk J. i in., *Materials*, 2021, 14, 24, 7794.
- [13] Łukaszek-Sołek A. i in., *Materials*, 2022, 15, 7817.
- [14] Krawczyk J. i in., *Material Technologies in Silesia 2022. Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych*, 85–86.
- [15] Bembenek M., i in., *Engineering Failure Analysis*, 2022, 142, 106843.

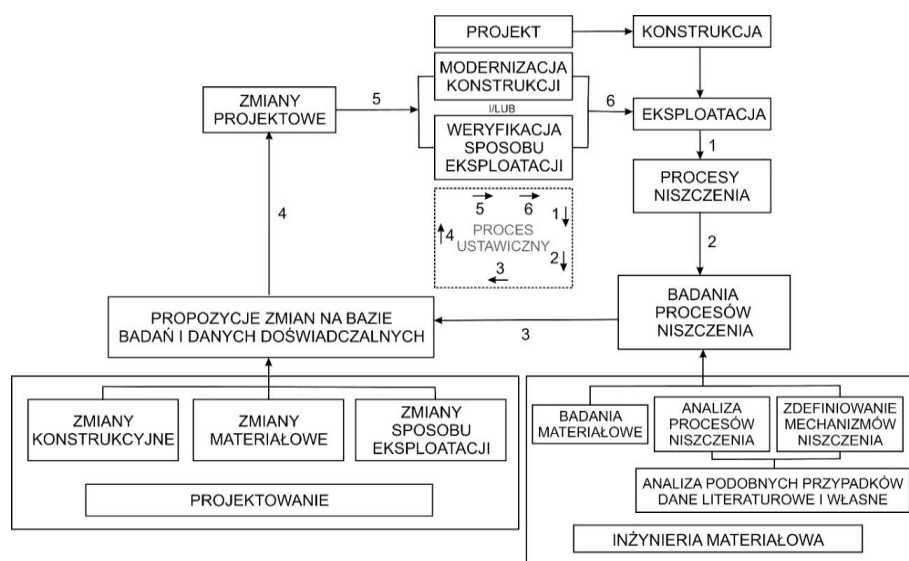
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA – STARSZA CZY MŁODSZA SIOSTRA INŻYNIERII MECHANICZNEJ? MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING – OLDER OR YOUNGER SISTER OF MECHANICAL ENGINEERING?

Lachowicz M.M.^{1,*}

¹ Politechnika Wroclawska, Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: marzena.lachowicz@pwr.edu.pl

Nowoczesne podejście do wielu zagadnień naukowych wymaga często wiedzy pochodzącej jednocześnie z wielu dyscyplin naukowych. Staje się to w obecnych czasach praktycznie koniecznością, jeżeli weźmiemy pod uwagę złożoność oraz różnorodność istniejących problemów technicznych. Uzyskanie odpowiedzi na nurtujące nas pytania w takich zagadnieniach wymaga poszukiwania oraz prowadzenia badań w obszarach, które łączą ze sobą różne dziedziny naukowe, a także wymagają wykorzystania różnorodnych metod badawczych. Niejednokrotnie dopiero takie interdyscyplinarne, ale dzięki temu kompleksowe spojrzenie na poruszane zagadnienia, pozwala na metodologiczne ujęcie oraz syntezę uzyskanych wyników. Przykładowo takiego spojrzenia bardzo często wymagają zagadnienia związane z inżynierią mechaniczną, które wymuszają uwzględnienie w swoich badaniach wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej. W szczególności dotyczy to zagadnień naukowych związanych z procesami technologicznymi materiałów, takimi jak obróbka plastyczna, spajanie czy obróbka mechaniczna, w przypadku których trudno wspólnie wyobrazić sobie nieuwzględnianie w swoich rozważaniach badań strukturalnych. Inżynieria materiałowa staje się również podstawą do opisu i rozważań dotyczących mechanizmów zużycia się i niszczenia części maszyn oraz urządzeń. Wymaga to ujęcia systemowego i powiązania tych zagadnień nie tylko z warunkami eksploatacyjnymi, ale również z rolą mikrostruktury kształtowanej w procesach technologicznych na zachodzące zmiany w ich warstwach eksploatacyjnych. Motywacją przedstawionej pracy były własne rozważania autorki na temat wzajemnych relacji łączących inżynierię materiałową z inżynierią mechaniczną, a będące efektem jej dotychczasowych doświadczeń naukowych. Podwaliny tych rozważań stanowi m.in. schemat przedstawiony w 2009 roku przez Prof. Janusza Dobrzańskiego [1], a przedstawiający zależności występujące pomiędzy zagadnieniami z zakresu budowy i eksploatacji maszyn oraz urządzeń, mechanizmami ich niszczenia a zagadnieniami materiałowymi (rys. 1).



Rys. 1. Schemat przedstawiający wzajemne relacje występujące pomiędzy zagadnieniami z zakresu konstrukcji maszyn i urządzeń a inżynierią materiałową [1]

Znaczną uwagę skupiono na bliskich autorce zagadnieniach związanych z korozją części maszyn i urządzeń, których wielowątkowość również wymaga łączenia ze sobą wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej i mechanicznej, ale także inżynierii chemicznej [2]. Przedstawiona praca ma być motywacją dla młodych pracowników nauki – uczestników Szkoły Inżynierii Materiałowej – do interdyscyplinarności realizowanych badań, a w szczególności podkreślać potrzebę tworzenia przez nich multidyscyplinarnych zespołów w ich dalszej pracy naukowej.

Literatura:

- [1]. Dobrzański J.: Diagnostyka uszkodzeń elementów ciśnieniowych urządzeń energetycznych w ocenie przyczyn powstawania awarii na podstawie badań materiałowych, Prace IMŻ, nr 2, Gliwice 2009, s. 36-45.
[2]. Lachowicz M.M.: Elektrochemiczne i mikrostrukturalne aspekty rozwoju niszczenia korozyjnego części maszyn i urządzeń, monografia. Radom, Wrocław: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2020.

WYTWARZANIE I CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW CIENKOWARSTWOWYCH W ZAKRESIE ICH ZASTOSOWAŃ W CHŁODZENIU RADIACYJNYM

FABRICATION AND CHARACTERISATION OF THIN FILM MATERIALS IN VIEW OF THEIR USES FOR RADIATIVE COOLING

Łukaszkiwicz N.^{1,2,*}, Hain C.^{1,3}, Nelis T.^{1,3}

¹ Bern University of Applied Sciences, Group for Plasma Surface Engineering, Quellgasse 21, 2502 Biel/Bienne, Switzerland

² Poznań University of Technology, Institute of Materials Science and Engineering, Jana Pawła II 24, 61-138 Poznań, Poland

³ Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory for Mechanics of Materials and Nanostructures, Feuerwerkerstrasse 39, 3602 Thun, Switzerland

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: natalia.lukaszkiwicz@student.put.poznan.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Pasywne dzienne chłodzenie radiacyjne (ang. *passive daytime radiative cooling*, PDRC) pozwala na obniżanie temperatury obiektów poniżej temperatury otoczenia bez użycia energii elektrycznej, wypromieniowując ciepło w przestrzeń kosmiczną z pominięciem atmosfery. Efekt ten można osiągnąć dzięki materiałom o odpowiednio zaprojektowanych strukturze i składzie. Poprzez dobór odpowiednich grubości warstw wykonanych z materiałów o wysokiej emisyjności w zakresie długości fal 8-13 μm , uzyskać można strukturę wykazującą selektywną emisyjność i wysoki współczynnik odbicia promieniowania słonecznego. Przedstawione badania skupiały się na ocenieniu możliwości wytworzenia, a także charakterystyki wielowarstwowej struktury opartej o cienkie filmy, typowej dla pasywnych urządzeń chłodzących. Do wytwarzania zastosowano kombinację zaawansowanych metod osadzania wspomaganych plazmą mikrofalową, tj. osadzanie z fazy gazowej (ang. *chemical vapour deposition*, CVD) oraz impulsowe rozpylanie magnetonowe wysokiej mocy (ang. *high power impulse magnetron sputtering*, HiPIMS). Monowarstwy, wytwarzane najpierw w celu optymalizacji procesu, oraz gotową multiwarstwę scharakteryzowano wykorzystując następujące techniki badawcze: skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), reflektometria rentgenowska (XRR) oraz elipsometria spektroskopowa. Warstwy oparte zostały o srebro, użyte jako wysoce refleksyjna powłoka bazowa, a także dwutlenek tytanu i dwutlenek krzemu, użyte jako naprzemiennie warstwy o wysokim i niskim współczynniku załamania światła, cechujące się wysoką emisyjnością w zakresie okna atmosferycznego.

2. Najważniejsze wyniki

Każdy z wykorzystanych materiałów, tj. Ag, TiO₂ i SiO₂, osadzono w formie monowarstw w celu określenia prędkości osadzania oraz zmierzenia ich właściwości tak, aby spełniły one teoretyczne wymagania potrzebne do otrzymania selektywnej emisyjności i wysokiego współczynnika odbicia próbki wielowarstwowej. Otrzymane warstwy SiO₂ i TiO₂ charakteryzowały się właściwościami optycznymi zbliżonymi do wartości teoretycznych. Następnie osadzono próbkę wielowarstwową, zaczynając od cienkiej warstwy Ti służącej jako warstwa adhezyjna pomiędzy substratem krzemowym, a powłoką Ag. Potem osadzono naprzemiennie SiO₂ i TiO₂, najpierw cztery warstwy o grubościach w ok. 60 nm każda, a później trzy warstwy o grubościach ok. 250 nm. Warstwa Ag posiadała ziarnistą morfologię i porowatość, a następująca po niej bezpośrednio warstwa SiO₂ słabo do niej przylegała. W kolejnych warstwach tlenków problem słabego przylegania nie został zaobserwowany.

3. Dyskusja i wnioski

Osadzenie monowarstw poszczególnych materiałów zapewniło otrzymanie grubości wielowarstw w założonych zakresach. Szybkość osadzania każdej z warstw mogłaby zostać dalej poprawiona poprzez dalszą optymalizację parametrów procesu np. zwiększenie liczby targetów czy mocy plazmy mikrofalowej. Podczas wcześniejszych procesów osadzania zauważono niską adhezję srebra zarówno do powierzchni substratu krzemowego, jak i do warstwy SiO₂ osadzonej na nim. Zastosowanie warstwy tytanu (grubość ok. 35 nm) miało na celu poprawę przylegania srebra do substratu. Duża chropowatość i porowatość srebra wpłynęła negatywnie na kolejne warstwy. W rezultacie multiwarstwę charakteryzowała wysoka chropowatość powierzchni, która nie jest pożądaną właściwością do badanego zastosowania. Utrudniła ona także charakterystykę właściwości optycznych multiwarstwy za pomocą elipsometrii. Jednakże na podstawie wcześniejszych badań można przypuszczać, że poprawa morfologii i stopnia upakowania warstwy srebra skutkowałaby otrzymaniem urządzenia zdatnego do dalszych badań pod kątem zdolności do pasywnego chłodzenia radiacyjnego.

4. Podziękowania

Praca badawcza została wykonana korzystając z infrastruktury BFH, Empa, i TOFWERK AG. Autorzy dziękują dr inż. M. Wątrobie oraz dr inż. K. Maćkoszowi za wsparcie i dyskusje.

5. Literatura

- [1] A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, and S. Fan, "Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight," *Nature*, vol. 515, no. 7528, pp. 540–544, 2014, doi: 10.1038/nature13883.
- [2] S. Y. Jeong et al., "Field investigation of a photonic multi-layered TiO₂ passive radiative cooler in sub-tropical climate," *Renew Energy*, vol. 146, pp. 44–55, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.119>.
- [3] K.-T. Lin, J. Han, K. Li, C. Guo, H. Lin, and B. Jia, "Radiative cooling: Fundamental physics, atmospheric influences, materials and structural engineering, applications and beyond," *Nano Energy*, vol. 80, p. 105517, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105517>.

WPLYW OBRÓBKI CIEPLNEJ NA STRUKTURĘ I WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZY FSW ZE STOPU MAGNEZU WE43

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FSW JOINTS MADE OF WE43 MAGNESIUM ALLOY

Lyczkowska K.¹, Baluch K.¹, Miara D.², Gładys K.¹, Mrowiec A.¹

¹ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Krasińskiego 8, 40-219 Katowice, Polska

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: katarzyna.baluch@polsl.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Struktura stopu Mg-Y-RE-Zr (np. WE43) w stanie lanym nie zapewnia odpowiedniego poziomu właściwości mechanicznych, dlatego stop WE43 jest przesycający i starzony [1]. Przesycający stop WE43 przeprowadza się z temperatury powyżej 525°C, zwykle po wygrzewaniu przez 8 h [2]. Stop WE43 znalazł zastosowanie na elementy silników samochodów wyścigowych oraz elementy układu napędowego samolotów ze względu na odporność na działające w tych warunkach eksploatacji bardzo wysokie obciążenia i temperatury [1].

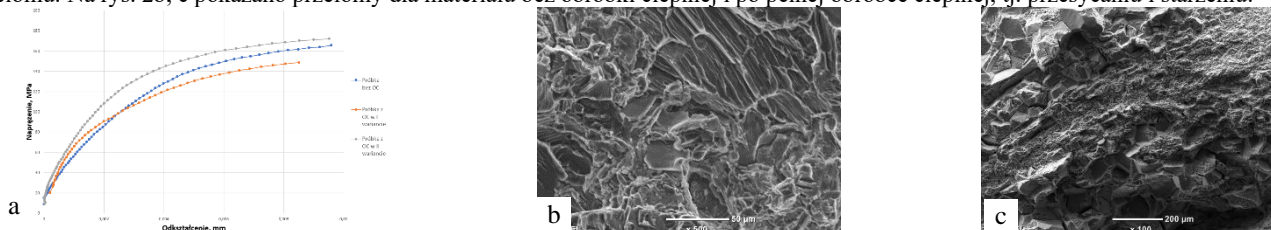
W pracy przeprowadzono próby technologiczne zgrzewania FSW odlewanych płyt ze stopu WE43. Wykonano złącza doczołowe przy prędkości obrotowej narzędzia 355 obr./min. i prędkości zgrzewania 244 mm/min. (rys. 1a). Makrostrukturę złącza pokazano na rys. 1b. Następnie złącza były obrabiane cieplnie w dwóch wariantach tj. złącza były przesycające w temperaturze 525°C przez 8 godzin i chłodzone na powietrzu, w drugim wariantcie po przesycającu złącza były dodatkowo starzone w temp. 250°C przez 16 godzin i chłodzone na powietrzu. Z tak obrabionych złączy przygotowano próbki do statycznej próby rozciągania (rys. 1c)



Rys. 1. Wykonane złącza stopu WE43 zgrzewane metodą FSW: a) lico połączenia, b) makrostruktura złącza, c) próbki po obróbce cieplnej do statycznej próby rozciągania

2. Najważniejsze wyniki

Styczną próbę rozciągania wykonano w temperaturze pokojowej wg normy PN-EN ISO 6892-1. Do badania została wykorzystana maszyna wytrzymałościowa Zwick Z600E. Prędkość rozciągania wynosiła 4 mm/min. Długości pomiarowe zostały dobrane indywidualnie do wymiarów każdej z próbek. Przykładowe krzywe rozciągania pokazano na rys. 2a. Uzupełnieniem badań były obserwacje przełomów na elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM), w technice rejestracji elektronów wtórnych (SE), co umożliwia obserwację topografii przełomu. Na rys. 2b, c pokazano przełomy dla materiału bez obróbki cieplnej i po pełnej obróbce cieplnej, tj. przesycającu i starzeniu.



Rys. 2. Wyniki statycznej próby rozciągania złączy stopu WE43 wykonanych metoda FSW: a) krzywe rozciągania, b) przełom próbki bez obróbki cieplnej, c) przełom próbki po pełnej obróbce cieplnej

Na podstawie przeprowadzonych badań własności wytrzymałościowych stwierdzono, że wytrzymałość (R_m) złączy bez obróbki cieplnej wynosi 185 MPa, granica plastyczności (R_e) 142 MPa a wydłużenie (A_5) jest na poziomie 9%. Po przesycającu właściwości wytrzymałościowe złączy spadają i wynoszą odpowiednio $R_m = 176$ MPa, $R_e = 114$ MPa a wydłużenie A_5 wynosi tylko 3 %, natomiast po przesycającu i starzeniu (pełna obróbka cieplna) wytrzymałość wzrasta do poziomu $R_m = 184$ MPa, granica plastyczności wynosi $R_e = 143$ MPa a wydłużenie 2% (rys. 2a). Na powierzchni przełomu próbki bez obróbki cieplnej obserwowano przełom kruchy z wyraźnymi obszarami przełomu transkryształicznego (rys. 2b). W przypadku próbki po pełnej obróbce cieplnej przełom był przełomem kruchym o strukturze mieszanej transkryształicznej i międzyziarnistej (rys. 2c).

3. Dyskusja i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych wyników i ich analizy stwierdzono, że najlepsze właściwości wytrzymałościowe złączy zgrzewanych metodą FSW płyt ze stopu WE43 uzyskano przy prędkości zgrzewania 280 mm/min. i prędkości obrotowej narzędzia 355 obr./min. bez obróbki cieplnej.

4. Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach projektu nr SKN/SP/535438/2022 pt.: Innowacyjna technologia łączenia stopu magnezu z dodatkiem itru (WE43) metodą Friction Stir Welding. Dofinansowano przez Ministra Edukacji i Nauki ze środków z budżetu państwa w ramach programu „Studentkie koła naukowe tworzą innowacje”.

5. Literatura

- [1] Friedrich H.E., Mordike B.L. (Eds), Magnesium Technology. Metallurgy, Design Data, Applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [2] Materiały informacyjne firmy Magnesium Elektron – www.magnesium-elektron.com

WIELOASPEKTOWA AKTYWIZACJA UCZNIÓW SZKÓŁ ŚREDNICH, CZYLI AKTYWNOŚCI WIMIIP AGH ZWIĄZANE Z POPULARYZACJĄ NAUK TECHNICZNYCH

MULTIFACETED ACTIVATION OF SECONDARY SCHOOL STUDENTS RESULTING FROM WIMIIP AGH ACTIVITIES RELATED TO THE POPULARIZATION OF TECHNICAL SCIENCES

Michta G.^{1,*}, Ciesielka M.¹, Mrzygłód B.¹, Smyk A.¹, Śleboda T.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: gmichta@agh.edu.pl

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie prowadzi szereg działań, które mają na celu popularyzację nauki w społeczeństwie z wykorzystaniem nowoczesnych metod i technik przekazu. Działania te szczególnie skierowane są bezpośrednio do uczniów szkół średnich niezależnie od profilu szkoły i klasy, jako forma aktywizacji i nawiązania bezpośrednich relacji z młodzieżą. Kluczowymi elementami wyzwania przed jakim stoją pracownicy Wydziału jest oparcie prowadzonych prac na trzech filarach, po pierwsze: popularyzacja nauk technicznych, po drugie: popularyzacja samej kultury studiowania i zachęcenie do podejmowania wyzwania jakim jest dalsze kształcenie, i po trzecie: zachęcenie do podejmowania nieszablonowych aktywności przez uczniów.

Głównym celem pierwszego filaru jest popularyzacja kierunków studiów, które są oferowane na uczelniach politechnicznych. Aktualnie wśród młodzieży spada chęć podjęcia studiów technicznych a jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest niska świadomość, co do wiedzy i możliwości rozwoju jakie one dają. Wśród nauk technicznych jest wiele tradycyjnych zagadnień, ale jest także bardzo dużo innowacyjnych dających wręcz pewność zatrudnienia w przemyśle albo założenia własnych startupów. Dziś młody człowiek musi usłyszeć, że proponowana wiedza z zakresu nauk technicznych, w tym inżynierii metali, będzie przydatna dla niego i społeczeństwa oraz pozwoli mu na rozwój i zdobycie ciekawej pracy w przyszłości oraz pokazanie jak fascynujący jest świat nauki związany z odkrywaniem zagadnień dotyczących nauk ścisłych. Polski przemysł wchodzi w fazę intensywnego rozwoju. Nauki techniczne w tym inżynieria materiałowa, jest jednym z filarów postępu technologicznego. Bez coraz to lepszych materiałów nie ma możliwości zbudowania nowocześniejszych, bardziej innowacyjnych maszyn, urządzeń, robotów itp. W Polsce rozpoczyna się złota era dla inżynierów. To od ich kompetencji i wykształcenia będzie zależeć szybkość i jakość przeprowadzania transformacji cyfrowej przedsiębiorstw do przemysłu 4.0, budowa elektrowni atomowych czy podróży kosmicznych.

Celem drugiego filaru jest popularyzacja kultury studiowania. Czy młody człowiek dziś planuje iść na studia? Ostatnie lata wiele zmieniły w samej tematyce kształcenia. Zmienia się także postrzeganie świata czy swojej przyszłości wśród młodzieży. Wyraźnym trendem wśród młodzieży okazuje się tzw. postawa życiowa „Good Enough”, czyli funkcjonowanie społeczne, które zapewnia przeciętne rezultaty przy niewielkim wysiłku i zaangażowaniu, co powoduje, że studia techniczne nie są popularne. Dodatkowo pandemia zamknęła młodych na wiele miesięcy i spowodowała znaczne trudności w przyswajaniu wiedzy jak i ograniczenie kontaktów między rówieśniczych. Uczniowie stracili na pewności siebie i obniżyli swoje wymagania co do przyszłości. Uczelnie techniczne odnotowują aktualnie duży spadek zainteresowania kontynuowaniem nauki wśród młodych osób (maturzystów). Bardziej wymagające studia techniczne – wymagają dodatkowego promowania – nie tylko samej koncepcji kształcenia, ale także samej tematyki studiów i ich użyteczności na rynku pracy. Zaproponowane aktywności przez pracowników WIMIIP pozwalają się ukierunkować na nową, ciekawą tematykę, pokazują, że studia to kształcenie na wysokim poziomie, ale przede wszystkim rozwijają uczniów w sposób nowoczesny, ciekawy i bliski ich aktualnym zainteresowaniom i życiu.

Trzeci filar to aktywizacja. Proponowane przez pracowników Wydziału aktywności są nowoczesne i nieszablonowe, zgodne z aktywnościami oferowanymi przez najlepsze światowe uczelnie. Grywalizacja, tutoring, mentoring, social media... To tylko niektóre z haseł pokazujących ideę popularyzacji nauki i studiowania. Obecnie młodego człowieka trzeba zachęcić, aby mu się „chciało”. Młodzież dziś w wielu przypadkach utraciła zainteresowania. Jest to znak dzisiejszych czasów, zamknięcia w domu, kumulacji wymagań w stosunku do uczniów. Psychologicznie są to trudne czasy do podejmowania aktywności i zaangażowania się w pracę. Utracona także została idea wspólnego działania grupowego czy organizacji pracy w zespole.

Proponowane przez Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH aktywności mają na celu podjąć dodatkowe działania, aby zachęcić młodzież do pracy w zespołach, spotykania się i budowania pozytywnych relacji społecznych, a także dodatkowej integracji – choćby w małych społecznościach klas. Dają szansę na poprawę kondycji psychicznej młodzieży poprzez wspieranie ich kreatywności i włączanie w aktywność akademicką. Jest to traktowane przez uczniów jako wejście w nowe środowisko i tworzenie zupełnie nowej społeczności. Dodatkowo to szansa na nawiązanie zupełnie nowych relacji pomiędzy grupami, rywalizacji na zasadzie gry międzyszkolnej na skalę ogólnokrajową i co ważne uczestnicy otrzymują bezpośredni kontakt ze społecznością akademicką (wykładowcy, studenci, pracownicy).



Spółeczna
Odpowiedzialność
Nauki

Podziękowania

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Społeczna odpowiedzialność nauki” nr projektu SONP/SP/548044/2022

WPLYW PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI PODŁOŻY TYTANOWYCH NA MIKROSTRUKTURĘ, TOPOGRAFIĘ I WŁAŚCIWOŚCI POWIERZCHNI POWŁOK TTO/CHITOZAN I TERPINEN-4-OL/CHITOZAN OSADZANYCH ELEKTROFORETYCZNIE

INFLUENCE OF SURFACE PREPARATION OF TITANIUM SUBSTRATES ON MICROSTRUCTURE, SURFACE TOPOGRAPHY AND PROPERTIES OF TTO/CHITOSAN AND TERPINEN-4-OL/CHITOSAN COATINGS DEPOSITED ELECTROPHORETICALLY

Mielczarek M.^{1,*}, Moskalewicz T.¹

¹Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

* Kontakt korespondencyjny: e-mail: mmielcz@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Osadzanie elektroforetyczne jest metodą pozwalającą na uzyskanie naturalnych powłok kompozytowych na podłożach metalowych w temperaturze pokojowej. Znajduje zastosowanie do wytwarzania powłok, zwłaszcza dla inżynierii biomedycznej. Jednymi z najczęściej wytwarzanych są powłoki o osnowie chitozanu [1]. Obecnie realizowane są badania nad antybakteryjnymi powłokami kompozytowymi, w których do osnowy chitozanej wprowadzane są różne substancje naturalne. Takie kompozyty mogą wykazywać korzystne właściwości biologiczne, takie jak sprzyjanie gojeniu ran, bioaktywność czy właściwości antybakteryjne [2]. Do perspektywicznych dodatków naturalnych należą olejki eteryczne. Jednym z najczęściej analizowanych pod tym względem jest olejek z drzewa herbacianego (*ang. Tea Tree Oil*, TTO) oraz jego podstawowy składnik terpinen-4-ol [3]. W niniejszej pracy zbadano wpływ przygotowania powierzchni podłoża tytanowych na adhezję, mikrostrukturę, topografię i właściwości powierzchni powłok o osnowie chitozanu z dodatkiem TTO i terpinen-4-olu. Tytan techniczny (Grade 1) był użyty w stanie dostawy, po trawieniu kwasami HF i HNO₃ oraz po szlifowaniu papierem ściernym o gradacji 600. Powłoki wytworzono metodą osadzania elektroforetycznego z roztworu chitozanu (2 g/l) w alkoholu etylowym z dodatkiem TTO lub terpinen-4-olu o stężeniu 10 ml/l. Warunki osadzania (napięcie prądu 10 V i czas 5 min) dobrano na podstawie parametrów osadzania powłok TTO/chitozan na stopie Zr-2,5Nb opisanych w naszej wcześniejszej pracy [1]. Podczas osadzania zmierzono gęstość prądu za pomocą multimetru. Adhezję powłok do podłoża zbadano za pomocą próby siatki nacięć zgodnie z normą ASTM D3359-97. Mikrostrukturę i morfologię powłok analizowano przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM), zaś topografię powierzchni przy pomocy profilometrii optycznej. Pomiary kąta zwilżania i swobodnej energii powierzchniowej (*ang. surface free energy*, SFE) przeprowadzono metodą osadzonej kropli.

2. Najważniejsze wyniki

Wykazano, że zarówno TTO, jak i terpinen-4-ol współosadzają się z chitozaniem na katodzie w sposób bardzo podobny. Analiza gęstości prądu wykazała, że przygotowanie powierzchni podłoża ma wpływ na przebieg osadzania. Najwyższe wartości gęstości prądu odnotowano dla próbek w stanie dostawy, a najniższe dla podłoża poddanych trawieniu. Stwierdzono istotny wpływ przygotowania powierzchni podłoża na adhezję powłok. Powłoki miały bardzo małą adhezję do podłoża w stanie dostawy (najmniejsza klasa adhezji 0B). W przypadkach powłok osadzanych na podłożach trawionych i szlifowanych klasa adhezji wyniosła 4B i 5B, co oznacza odpowiednio dużą i bardzo dużą adhezję. Mikrostruktura powłok kompozytowych zbudowana była z kropeł TTO lub terpinen-4-olu rozproszonych w osnowie chitozanu. Zauważono, że przygotowanie powierzchni podłoża ma istotny wpływ na rozmieszczenie i średnicę kropeł obu substancji. W przypadku podłoża trawionych występował duży udział fazy rozproszonej na całej analizowanej powierzchni powłok. Średnica kropeł wynosiła do około 20 μm. W przypadku powłok osadzonych na podłożach szlifowanych zaobserwowano znaczne rozproszenie i rozdrobnienie fazy rozproszonej. Krople były rozmieszczone w miarę regularnie na całej powierzchni próbki i były mniejsze od tych w powłokach na podłożach trawionych (średnica do około 10 μm). Zauważono, że TTO tworzy większe krople od terpinen-4-olu. Obserwacje powłok na przekroju poprzecznym przy użyciu TEM wykazały, że grubość uzyskanych powłok wynosi około 4 μm. Parametry chropowatości (Ra, Rq, Rt), jak i stopień rozwinięcia powierzchni były większe dla powłok osadzanych na podłożach trawionych od tych dla powłok na podłożach szlifowanych. Powłoki uzyskane na podłożach trawionych charakteryzowały się mniejszym kątem zwilżania z wodą destylowaną (do około 70°) od powłok osadzonych na podłożach szlifowanych (do około 80°). Wartości te były większe od kąta zwilżania podłoża szlifowanych (około 45°) i mniejsze od kąta zwilżania podłoża trawionych (około 85°). Wartości SFE różniły się w zależności od wykorzystanego podłoża. Dla powłok osadzanych na podłożach trawionych wartość SFE wyniosła około 50 mN/m, a dla powłok osadzonych na podłożach szlifowanych około 40 mN/m. Wartości te były odpowiednio większe od SFE podłoża trawionych (około 45 mN/m) i mniejsze od SFE dla podłoża szlifowanych (około 55 mN/m).

3. Podsumowanie

Opracowano wstępne warunki osadzania elektroforetycznego powłok o osnowie chitozanu z dodatkami TTO i terpinen-4-olu na podłożach z tytanu technicznego. Obie powłoki były zbudowane z kropeł TTO lub terpinen-4-olu rozproszonych w osnowie chitozanu. Na ich średnicę oraz rozmieszczenie wpływ miało zarówno przygotowanie powierzchni podłoża, jak i rodzaj fazy rozproszonej. Wykazano, że powłoki osadzone na podłożach szlifowanych wykazały największą adhezję oraz charakteryzowały się najmniejszą hydrofilowością powierzchni.

4. Podziękowania

Badania zostały sfinansowane w całości przez Narodowe Centrum Nauki (projekt nr DEC-2022/45/B/ST5/00242).

5. Literatura

- [1] M. Mielczarek, J. Marchewka, K. Kowalski, Ł. Cieniek, M. Sitarz, and T. Moskalewicz, 'Effect of tea tree oil addition on the microstructure, structure and selected properties of chitosan-based coatings electrophoretically deposited on zirconium alloy substrates', *Appl. Surf. Sci.*, 609, 155266, 2023, doi: 10.1016/j.apsusc.2022.155266.
- [2] E. Pereira Dos Santos *et al.*, 'Chitosan/Essential Oils Formulations for Potential Use as Wound Dressing: Physical and Antimicrobial Properties', *Mater. (Basel, Switzerland)*, 12, 14, 2019, doi: 10.3390/ma12142223.
- [3] M. D. Baldissera *et al.*, 'In vitro and in vivo action of terpinen-4-ol, γ-terpinene, and α-terpinene against *Trypanosoma evansi*', *Exp. Parasitol.*, 162, 43–48, 2016, doi: 10.1016/j.exppara.2016.01.004.

PROJEKTOWANIE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH MASYWNYCH SZKIEŁ METALICZNYCH NA OSNOWIE Zr

DESIGN OF MECHANICAL PROPERTIES OF Zr-BASED BULK METALLIC GLASSES

Pajor K.^{1,*}, Pikulski D.¹, Koziel T.¹

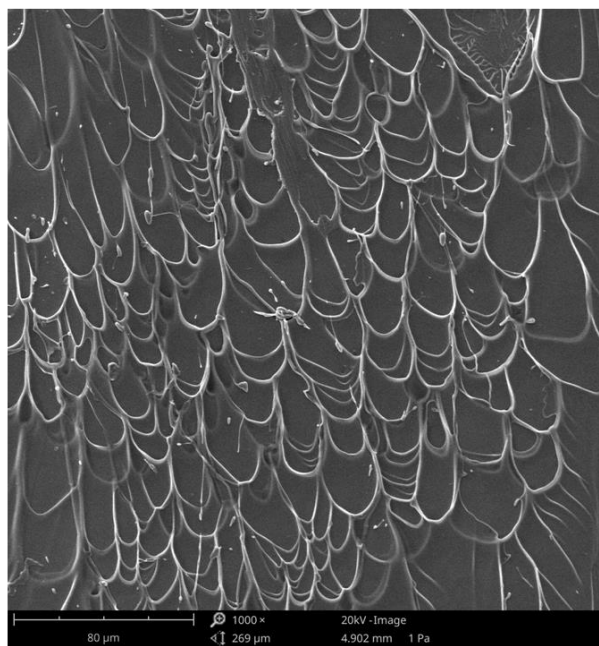
¹ AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: kpajor@agh.edu.pl

Masywne szkła metaliczne, dzięki amorficznej strukturze, charakteryzują się szeregiem interesujących właściwości fizycznych oraz chemicznych, dlatego często uważane są za obiecujący materiał przyszłości [1]. Właściwości mechaniczne tej grupy materiałów znacznie przekraczają możliwości ich krystalicznych odpowiedników, cechują się bowiem bardzo wysoką granicą plastyczności, dużym zakresem odkształceń sprężystych, wysoką twardością i odpornością na zużycie [1].

Właściwości mechaniczne materiałów krystalicznych oparte są w dużej mierze na defektach strukturalnych, takich jak wakancje, dyslokacje, granice ziaren i faz, które utrudniają lub ułatwiają poślizg po płaszczyznach krystalograficznych, nadając tym materiałom wytrzymałość i plastyczność [2]. Za defekty strukturalne w szklach metalicznych uważane są objętości swobodne umożliwiające uruchamianie pasm ścinania podczas odkształcenia, a ich udział objętościowy wpływa na wytrzymałość i zakres otrzymywanych odkształceń. Powstają one w trakcie zeszklenia stopu, a ich ilość jest wprost proporcjonalna do szybkości chłodzenia podczas tego procesu, co można zaobserwować różnicą w gęstości poszczególnych odlewów [3].

W niniejszej pracy wytworzono stop z układu Zr-Cu-Al w elektrycznym piecu łukowym, a następnie odlano metodą *suction casting* przy różnej temperaturze układu chłodzącego (12÷42°C). Strukturę odlewów zbadano przy pomocy dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Gęstość stopów zmierzono metodą Archimedesusa, a następnie porównano z zastosowanymi szybkościami chłodzenia. Badania statycznej próby ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej przy 4 szybkościach odkształcenia (10^{-4} ÷ 10^{-1} s⁻¹). Uzyskane przełomy poddano obserwacji SEM-SE (Rys. 1).



Rys. 1 Przykładowy przełom „żyłkowy” stopu Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀

Praca wsparta finansowaniem ze środków MNiSW w ramach badań statutowych AGH nr 16.16.110.663 oraz wsparta infrastrukturą badawczą Akademickiego Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH.

- [1] K. Gao, X.G. Zhu, L. Chen, W.H. Li, X. Xu, B.T. Pan, W.R. Li, W.H. Zhou, L. Li, W. Huang, Y. Li, Recent development in the application of bulk metallic glasses, *J. Mater. Sci. Technol.* 131 (2022) 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.05.028>.
- [2] M. Blicharski, *Wstęp do Inżynierii Materiałowej*, 3rd ed., WNT, Warszawa, 2013.
- [3] X. Hu, S.C. Ng, Y.P. Feng, Y. Li, Cooling-rate dependence of the density of Pd₄₀Ni₁₀Cu₃₀P₂₀ bulk metallic glass, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 64 (2001) 29–32. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.172201>.

WPLYW ZAWARTOŚCI TLENU NA ŚREDNICĘ KRYTYCZNĄ W SZKŁOTWÓRCZYM STOPIE $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$

EFFECT OF OXYGEN CONTENT ON THE CRITICAL DIAMETER IN THE $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$ GLASS-FORMING ALLOY

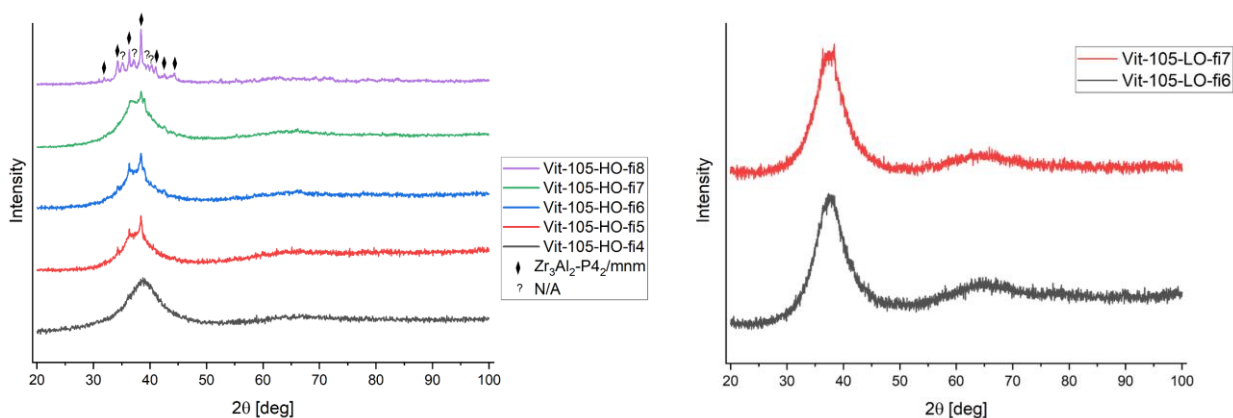
Pikulski D.A.^{1*}, Pajor K.¹, Kozieł T.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: dapikulski@gmail.com

Masywne szkła metaliczne (ang. Bulk metallic glasses – BMGs), to stopy metali charakteryzujące się strukturą amorficzną, która powstaje w wyniku szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego. W wyniku tej przemiany materiały te nie posiadają defektów typowych dla materiałów krystalicznych [1]. Z tego powodu posiadają one wyjątkowe właściwości chemiczne, fizyczne i mechaniczne, które nieustannie wzbudzają zainteresowanie naukowców od wielu lat [2]. Największą wadą szkieł metalicznych jest ich wysoka cena związana z ich wytwarzaniem oraz koniecznością stosowania pierwiastków elementarnych o bardzo wysokiej czystości [3]. Jednym z najczęściej występujących zanieczyszczeń jest tlen, który istotnie wpływa na zdolność do zeszklenia i właściwości stopów amorficznych [4].

Celem pracy było ustalenie wpływu zawartości tlenu na średnicę krytyczną zeszklenia stopu $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$. Stopy o różnej zawartości tlenu wytworzono z dwóch rodzajów cyrkonu – *Crystal Bar* o niskiej zawartości tlenu (LO) oraz *Sponge* o wysokiej zawartości tlenu (HO), przy stałej (wysokiej) czystości pozostałych składników, a następnie odlano metodą ssącą (ang. Suction casting) w formie prętów. Zawartość tlenu w obu wariantach zmierzono za pomocą fuzji w gazie obojętnym (LECO RO 416 DR). Średnicę krytyczną wyznaczono w oparciu o badania mikrostrukturalne z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (Phenom XL) wsparte dyfrakcją rentgenowską (Panalytical Empyrean) (Rys. 1). Do obliczenia kalorymetrycznych wskaźników zdolności do zeszklenia wyznaczono charakterystyczne temperatury (zeszklenia T_g , krystalizacji T_x oraz likwidus T_l) techniką różnicowej analizy termicznej (Setaram Labsys).



Rys.1 Dyfraktogramy stopu $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$ a) o wysokiej zawartości tlenu, b) o niskiej zawartości tlenu

Praca wsparta finansowaniem ze środków MNiSW w ramach badań statutowych AGH nr 16.16.110.663.

- [1] J. Lindwall: Modelling of Bulk Metallic Glass formation in Powder Bed Fusion, Luleå 2019, Luleå University of Technology Luleå, Sweden, ISBN: 978-91-7790-306-2; 978-91-7790-307-9
- [2] C. Suryanarayana and A. Inoue, Bulk Metallic Glasses, Second Edition, CRC Press, 2017.
- [3] S. J. Wu, Z. Q. Liu, R. T. Qu, and Z. F. Zhang, “Designing metallic glasses with optimal combinations of glass-forming ability and mechanical properties” Journal of Materials Science and Technology, vol. 67, pp. 254–264, Mar. 2021
- [4] W. Zhou et al., “The effect of oxygen on phase formation in an industrial Zr based bulk metallic glass” Intermetallics, vol. 129, Feb. 2021.

WŁAŚCIWOŚCI TŁUMIĄCE DWUSKŁADNIKOWYCH STOPÓW Al-Zn

DAMPING PROPERTIES OF BINARY Al-Zn ALLOYS

Piwowarski G.^{1,*}, Gracz B.¹, Krajewski W. K.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza im. St. Staszica, Wydział Odlewnictwa, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

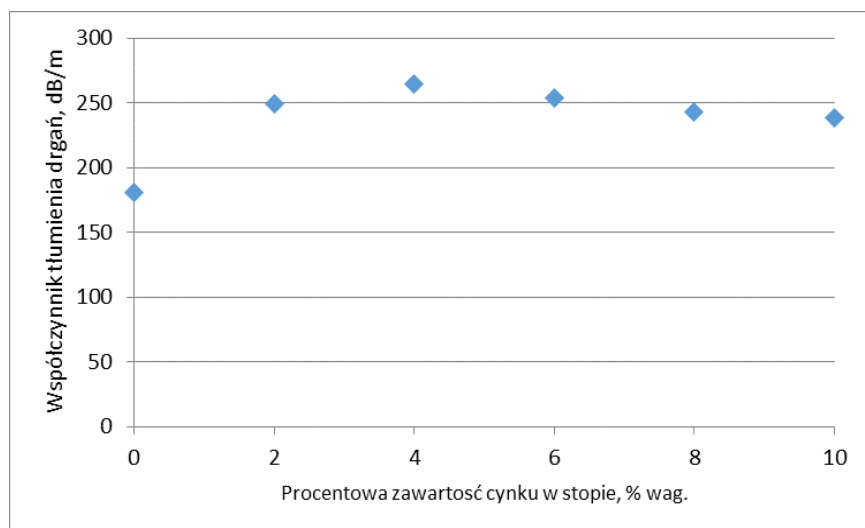
* Kontakt korespondencyjny: e-mail: piwgrz@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Stopy z układu Al-Zn stanowią grupę stopów, charakteryzujących się wysokimi właściwościami tłumiącymi. Do tworzyw metalowych, posiadających zdolność do tłumienia drgań mechanicznych zalicza się również brązy oraz żeliwo. Na zdolność do tłumienia drgań wpływ ma głównie struktura stopu. Budowa krystaliczna stopu oraz różnego rodzaju dyslokacje i wtrącenia wpływają na właściwości tłumiące [1-3]. Stop aluminium o założonym składzie wytopiono z czystych składników. Wytopy prowadzono w piecu tyglowym, oporowym w tyglu grafitowo-szametowym. Wtopiono i odlano próbki o zawartości 0%, 2%, 4%, 6%, 8% i 10% wagowych cynku. Próbki w kształcie walca o średnicy 40mm i wysokości 100mm odlewano do form wykonanych z klasycznej masy bentonitowej. Formy zostały wysuszone w suszarce laboratoryjnej i ostudzone do temperatury otoczenia około 20°C. We wnęce formy umieszczono termoelement. Spoina termoelementu znajdowała się w połowie wysokości próbki w osi walca. Po odlaniu i wystygnięciu, próbki poddawano obróbce. Próbki do badań właściwości tłumiących, o wysokości 40mm wycinano z miejsca pod termoelementem. Powierzchnie czołowe próbek szlifowano na wodnych papierach ściernych. Ostatni o ziarnistości 1200. Próbki badano wykorzystując falę ultradźwiękową o częstotliwości 1MHz. Do pomiarów wykorzystano zestaw komputerowy z odpowiednim oprzyrządowaniem. Najważniejszą częścią aparatury badawczej jest mikroślizowica nadawczo-odbiorcza o małej średnicy, która umożliwia badanie nawet niewielkich próbek. Badanie przeprowadzono metodą echa sygnału. Mierzono osłabienie sygnału fali drgającej po przejściu przez próbkę w odniesieniu do przebytej drogi sygnału.

2. Najważniejsze wyniki

Na rys. 1. przedstawiono wyniki badań wartości współczynnika tłumienia drgań w zależności od zawartości procentowej cynku w stopie Al-Zn. Badania przeprowadzono w temperaturze 20°C.



Rys. 1. Zestawienie wyników obliczonego współczynnika tłumienia drgań a w zależności od składu stopu

3. Dyskusja i wnioski

Dwuskładnikowe stopy Al-Zn charakteryzują się wysokimi właściwościami tłumiącymi. Z przeprowadzonych badań wynika, że najwyższe wartości współczynnika tłumienia drgań, w badanej grupie stopów uzyskał dla zawartości cynku w stopie wynoszącej 4% wagowe. Już niewielki dodatek cynku do aluminium tworzy strukturę stopu, która charakteryzuje się wysoką zdolnością do tłumienia drgań mechanicznych.

4. Podziękowania

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego UMO-2017/25/B/ST8/00150

5. Literatura

- [1] Krajewski W. K.: Stopy cynku z aluminium. Rodzaje, właściwości, zastosowanie. Kraków. Wydawnictwo Naukowe AKAPIT
- [2] Piwowarski G., Buraś J., Szucki M.: Influence of AlTi3C0.15 modification treatment on damping properties of ZnAl10 alloy. China Foundry. vol. 14 no. 4. 292–296. doi: 10.1007/s41230-017-7070-6
- [3] Krajewski W. K., Buraś J., Krajewski P. K., Piwowarski G.: Ultrasound wave attenuation of grain refined high-zinc aluminium sand-cast alloys. Archives of Foundry Engineering. vol. 15 no. 2. 51–54. doi: 10.1515/afe-2015-0037

BADANIA HETEROZŁĄCZ $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, LaFeO_3

RESEARCH ON HETEROJUNCTION $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, LaFeO_3

Sikora A.^{1,*}, Cieniek Ł.¹, Saitzek S.², Kopia A.¹

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

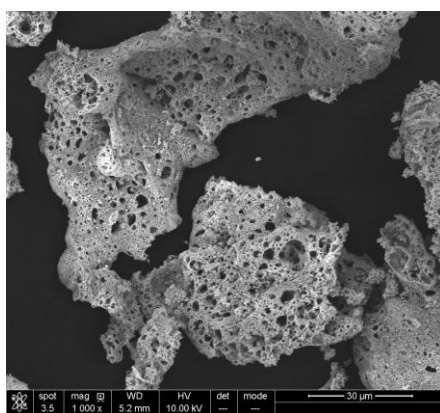
² University of Artois, Unité de Catalyse et Chimie du Solide, Rue Jean Souvraz - SP18, Lens, Francja

* asikora@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

W obliczu rosnącego zapotrzebowania na energię i zmian klimatu, poszukiwanie alternatywnych źródeł energii stało się jednym z najważniejszych wyzwań współczesnego świata. Odnawialne źródła energii są często uważane za rozwiązanie tego problemu, ponieważ mogą częściowo zaspokoić potrzeby energetyczne ludzkości przy minimalnym wpływie na środowisko. Badane materiały znajdują potencjalnie zastosowanie w konwersji energii słonecznej oraz fotodegradacji zanieczyszczeń przemysłowych. Celem badań było wytworzenie heterozłączeń tlenkowych opartych na kombinacji półprzewodników typu n oraz p. Proszki wytworzono metodą zol-żel. Badania strukturalne przeprowadzono przy pomocy techniki skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), przy zastosowaniu metody dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) wyznaczono średnią wielkość kryształitów oraz zidentyfikowano istniejące fazy. Własności foto-elektrochemiczne zbadano techniką chronoamperometrii (CA) w celu wyznaczenia wydajności konwersji padającego fotonu na elektron (IPCE_λ).

2. Najważniejsze wyniki



Rys. 1. Obraz SEM mieszanina proszków: $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ / $\text{La}_2\text{Fe}_2\text{O}_7$:80%/20%

Tabela 1. Własności fotokatalityczne, elektrochemiczne i fotoelektrochemiczne

Nr	Material	Dekompozycja [%]	Szybkość reakcji ϕ	V_{fb} [V]	E_g [eV]	$\text{IPCE}_{450\text{nm}}$ [%]
1.	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	8	0,0005	0,049	3,96	$2,03 \cdot 10^{-10}$
2.	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ / LaFeO_3 90%/10%	42	0,0051	-0,634	3,79	$1,69 \cdot 10^{-10}$
3.	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ / LaFeO_3 80%/20%	45	0,0058	-0,718	3,46	$1,96 \cdot 10^{-10}$
4.	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ / LaFeO_3 70%/30%	24	0,0017	-0,921	3,56	$1,23 \cdot 10^{-10}$
5.	$\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ / LaFeO_3 60%/40%	40	0,0052	-1,092	3,37	$1,64 \cdot 10^{-10}$

3. Dyskusja i wnioski

Proszki wytworzone metodą zol-żel wykazały nanometryczne rozmiary, nieregularne kształty oraz porowatą powierzchnię. Badane materiały charakteryzują się jednofazowym składem. Dodatek 20% LaFeO_3 zwiększał szybkość reakcji foto-degradacji tlenku chromu w porównaniu do czystego $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$. Jeżeli do czystego proszku $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ dodamy proszek LaFeO_3 wartość napięcia płaskiego pasma spadnie wraz ze zwiększającą ilością LaFeO_3 . Dodatek LaFeO_3 zmniejsza wartość przerwy energetycznej mieszaniny proszków. Największym współczynnikiem wydajności konwersji padającego fotonu na elektron zaobserwowano dla czystego proszku $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ oświetlanym światłem o długości fali $\lambda = 450\text{nm}$.

4. Podziękowania

Autorzy pragnęliby złożyć podziękowania programowi NAWA PPN/BFR/2019/00001 za wsparcie finansowe pracy.

5. Literatura

- [1] Bayart A. i in., Synthesis, structural and luminescence properties of $(\text{La}_{1-x}\text{Ln}_x)_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (Ln = lanthanides) solid solutions, Journal of Alloys and Compounds, 2016, 71-72.
- [2] Lewerenz H., Sharp I. D; Chapter 1: Concepts of Photoelectrochemical Energy Conversion and Fuel Generation, Royal Society of Chemical Energy and Environment Series, 2019, 3-42.
- [3] Saitzek S. i in., Microstructure and Nanoscale Piezoelectric/Ferroelectric Properties in $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (Ln = Lanthanide) Thin Films with Layered Perovskite Structure, Perovskites and Related Mixed Oxides: Concepts and Applications, 2015, 233-258.

OCENA STANU NAPRĘŻEŃ W ASYMETRYCZNIE WALCOWANYCH TAŚMACH TRB METODĄ SZUMÓW MAGNETYCZNYCH BARKHAUSENA EVALUATION OF STRESS STATE IN ASYMMETRICALLY ROLLED TRB STRIPS USING BARKHAUSEN NOISE METHOD

Sulek B.^{1,2,*}, Krawczyk J.³, Kokosza A.³, Kuźniar N.⁴

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Estkowskiego 6, 61-755 Poznań

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Szkoła Doktorska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

³ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

⁴ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: bartoszulek@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

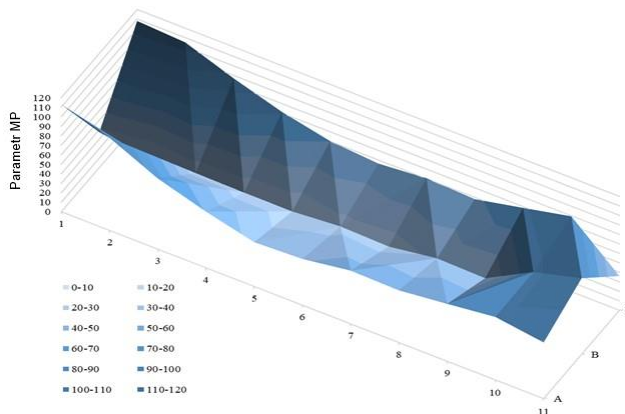
Taśmy walcowane o zmiennym przekroju należą do grupy wyrobów typu Tailored Blanks nazywanej Tailor Rolled Blanks. Obecnie w przemyśle oraz podczas badań laboratoryjnych stosuje się dwie główne odmiany technologii walcowania tego typu wyrobów. Pierwsza z nich nazywana jest *walcowaniem elastycznym* i umożliwia nadanie zmiennego przekroju taśmie w kierunku wzdłużnym wskutek okresowo zmiennej szczeliny walcowniczej. Druga odmiana polega natomiast na stopniowym i wielokrotnym kształtowaniu materiału za pomocą niewielkich dysków [1]. Przeprowadzone badania skupione były wokół trzeciej odmiany walcowania taśm TRB pozwalającej na uzyskanie zmiennego kształtu w kierunku poprzecznym za pomocą co najmniej jednego walca bruzdowego. W badanym przypadku komplet narzędzi składał się z jednego walca bruzdowego oraz drugiego gładkiego. Skutkiem tego było powstanie krzywizny pasma skierowanej w stronę walca bruzdowego. W ramach prac badano możliwość zmniejszenia wielkości tej krzywizny poprzez wprowadzenie do procesu walcowania celowej różnicy prędkości oraz współczynników tarcia pomiędzy walcami. Taki przypadek procesu walcowania nazywany jest *walcowaniem asymetrycznym* i przyczynia się m.in. do zmniejszenia sił walcowania, zwiększenia gniotu w jednym przebiegu walcowniczym oraz do wzrostu własności mechanicznych materiału [2, 3]. W celu oceny wpływu wielkości i rodzaju asymetrii procesu walcowania taśm TRB na stan naprężeń oraz umocnienie materiału wykonano pomiary wielkości szumów magnetycznych Barkhausena wyrażonych parametrem MP.

2. Najważniejsze wyniki

Przykładową taśmę uzyskaną podczas badań przedstawiono na rysunku 1, natomiast wykresy przedstawiające zmianę wielkości szumów magnetycznych Barkhausena w zależności od kierunku badań oraz od badanego obszaru w taśmie o zmiennym przekroju.



Rys. 1. Taśma TRB o szerokości 50 mm walcowana bez asymetrii



Rys. 2. Wynik obserwacji szumów Barkhausena w kierunku poprzecznym taśmy TRB walcowanej bez asymetrii

3. Dyskusja i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że dla każdego przypadku, w którym wprowadzono do procesu walcowania taśm TRB asymetrię, niezależnie od rodzaju oraz wielkości tej asymetrii uzyskano spadek sił procesowych. Powodem tego efektu było powstanie dodatkowych naprężeń ścinających wywołanych asymetrią procesu. Jednocześnie spadek sił wraz z obniżeniem krzywizny uzyskano natomiast tylko dla przypadku, w którym zastosowano podwójną asymetrię. Wyniki obserwacji szumów magnetycznych Barkhausena wykazały natomiast występowanie zróżnicowania w stanie naprężeń materiału na jego przekroju, a także ich wzrost wraz ze wzrostem wartości asymetrii. Dodatkowo na podstawie analizy wyników zaobserwowano wzrost naprężeń rozciągających w kierunku wzdłużnym taśm, natomiast wzrost naprężeń ściskających w kierunku poprzecznym.

4. Podziękowania

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach V edycji doktoratów wdrożeniowych

5. Literatura

- [1] Miyazaki Y., Sakiyama T., Kodama S.: Welding techniques for tailored blanks. Nippon Steel Technical Report 95, 46–52, (2007).
- [2] Kraner J., Smolar T., Volšak D., Cvahte P., Godec M., Paulin I.: A review of asymmetric rolling. Materials and Technologies 54(5), 731–743, (2020).
- [3] Polkowski W., Zasada D., Józwiak P.: Struktura i umocnienie żelaza Armco odkształconego metodą asymetrycznego walcowania (ASR). XLI Szkoła Inżynierii Materiałowej Kraków ÷ Krynica. 2013, 450–454

WPLYW MIKROSTRUKTURY NA KINETYKĘ EROZJI KAWITACYJNEJ NAPOINY, STOPU I POWŁOKI ZAWIERAJĄCYCH KOBALT

EFFECT OF MICROSTRUCTURE ON CAVITATION EROSION KINETICS OF WELD HARDFACING, METAL ALLOY AND SPRAYED COATING CONTAINING COBALT

Szala M.^{1,*}

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska

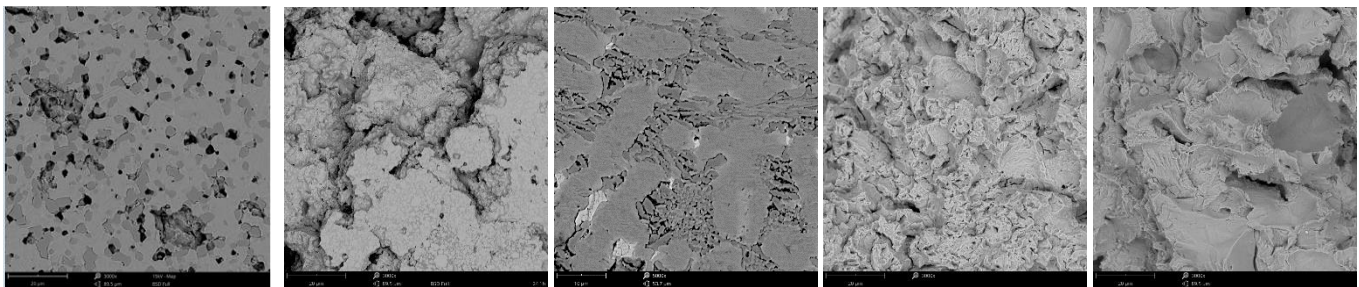
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: m.szala@pollub.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Stopy na osnowie kobaltu, niklu oraz natryskiwane powłoki cermetalowe opisywane są w literaturze jako wysoce odporne na erozję kawitacyjną. Referat syntetyzuje wyniki badań odporności na erozję kawitacyjną powłok napawanych, stopów metali, powłok natryskiwanych oraz referencyjnych stopów metali. Ideą pracy jest wytypowanie materiału o najwyższej odporności na erozję kawitacyjną oraz identyfikacja czynników mikrostrukturalnych umożliwiających uzyskanie wysokiej odporności erozyjnej.

2. Materiał i metody

Napoiny wytworzono z proszków o składzie CoCrWC na podłożu stalowym. CoCrWC napawano metodą TIG. Powłoki natryskiwane wytworzono metodą HVOF na podłożu stalowym z proszków o składzie WC-CoCr. Komercyjny stop kobaltu został wytworzony metodami metalurgii proszków. Materiał referencyjny stanowiły mosiądz, stal odporna na korozję oraz stal konstrukcyjna. Mikrostrukturę scharakteryzowano metodą SEM-EDS oraz XRD. Zbadano twardość napoin metodą Vickersa. Badania kawitacyjne prowadzono w wodzie destylowanej na stanowisku wibracyjnym ze stacjonarną próbką, dokonując obserwacji mikroskopowych oraz oceny ubytku masy. Odporność na zużycie określano metodami ilościowymi profilometryczną, wagową oraz na podstawie oceny jakościowej obszarów zużycia metodą SEM.



Rys. 1. Eroderowane powierzchnia stopu Stellite 6, powłoki natryskiwanej WC-CoCr, napoiny Stellite 6, stali AISI 304 oraz S235JR (różne czasy ekspozycji na działanie kawitacji), SEM.

3. Podsumowanie

Niniejsze badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Określono wpływ czynników mikrostrukturalnych na kinetykę niszczenia kawitacyjnego badanych materiałów.
- Zidentyfikowano mechanizmy zużycia erozyjnego.
- Zweryfikowano związek twardości z odpornością na erozję kawitacyjną.
- Najwyższą odpornością cechowała się napoina CoCrWC.
- Zaproponowano sposoby zwiększania odporności erozyjnej materiałów zawierających kobalt oraz dalsze kierunki badań.

4. Literatura

- [1] Phenomenological Model of Cavitation Erosion of Nitrogen ION Implanted Hiped Stellite 6 / Mirosław Szala // *Advances in Materials Science*.- 2023, vol. 23, nr 1, s. 98-109
- [2] Investigations of cavitation erosion and wear resistance of cermet coatings manufactured by HVOF spraying / E. Jonda, M. Szala, M. Sroka, L. Łatka, M. Walczak // *Applied Surface Science*.- 2023, vol. 608, s. 1-13
- [3] The effect of microstructure and mechanical properties on sliding wear and cavitation erosion of plasma coatings sprayed from Al₂O₃ + 40 wt% TiO₂ agglomerated powders / Leszek Łatka, Mirosław Szala, Monika Nowakowska, Mariusz Walczak, Tomasz Kielczawa, Paweł Sokołowski // *Surface and Coatings Technology*.- 2023, vol. 455, s. 1-13
- [4] Effect of Manganese Ion Implantation on Cavitation Erosion Resistance of HIPed Stellite 6 / M. Szala, D. Chocyk, M. Turek // *Acta Physica Polonica A*.- 2022, vol. 142, nr 6, s. 141-146
- [5] Effect of Microstructure and Hardness on Cavitation Erosion and Dry Sliding Wear of HVOF Deposited CoNiCrAlY, NiCoCrAlY and NiCrMoNbTa Coatings / Mirosław Szala, Mariusz Walczak and Aleksander Świetlicki // *Materials*.- 2022, vol. 15, nr 1, s. 1-15
- [6] Investigation into microstructure and mechanical properties effects on sliding wear and cavitation erosion of Al₂O₃-TiO₂ coatings sprayed by APS, SPS and S-HVOF / Monika Nowakowska, Leszek Łatka, Paweł Sokołowski, Mirosław Szala, Filofteia-Laura Toma, Mariusz Walczak // *Wear*.- 2022, nr 508-509, s. 1-15
- [7] Factors Influencing Cavitation Erosion of NiCrSiB Hardfacings Deposited by Oxy-Acetylene Powder Welding on Grey Cast Iron / Mirosław Szala, Mariusz Walczak, Tadeusz Hejwowski // *Advances in Science and Technology Research Journal*.- 2021, vol. 15, nr 4, s. 376-386

ZASTOSOWANIE ALGORYTMÓW OPTIMALIZACJI DO IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW MODELI STOCHASTYCZNYCH PRZY MODELOWANIU PRZEMIAN FAZOWYCH

APPLICATION OF OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF STOCHASTIC MODELS DURING PHASE TRANSFORMATIONS MODELING

Szeliga D.¹, Czyżewska N.², Foryś J.¹, Kusiak J.¹, Nadolski R.^{1,*}, Oprocha P.², Pietrzyk M.¹, Potorski P.², Przybyłowicz P.²

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

² Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Matematyki Stosowanej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

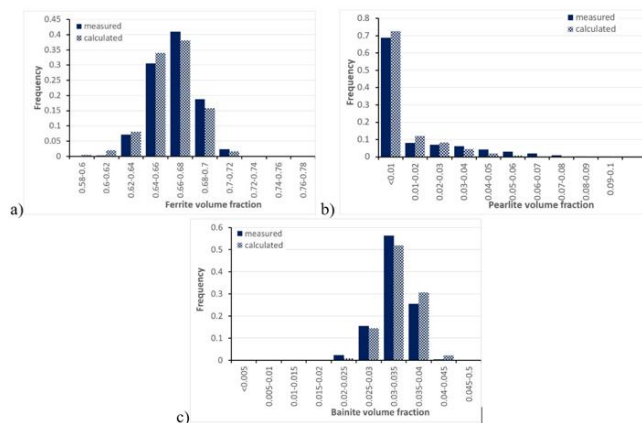
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: r.nadolsk@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

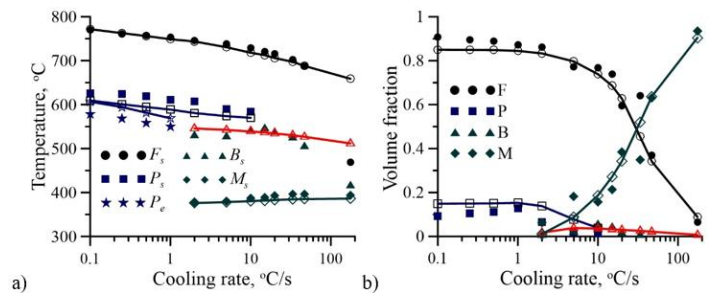
Zastosowanie zaawansowanych algorytmów optymalizacyjnych we współczesnych badaniach nad stalami wielofazowymi wykorzystuje rosnące moce obliczeniowe komputerów, prowadząc do bardziej precyzyjnych rezultatów i lepszego zrozumienia mikrostruktury oraz charakterystyk tych zaawansowanych materiałów. Współczesne podejście do identyfikacji materiałów coraz częściej opiera się na stochastycznych rozkładach cech mikrostrukturalnych, co otwiera nowe możliwości precyzyjnej analizy właściwości stali i innych materiałów. Celem przeprowadzonych badań było opracowanie zaawansowanego modelu numerycznego do analizy stali wielofazowych z niejednorodną mikrostrukturą. W naszych badaniach skupialiśmy się na rozwinięciu podejścia wieloskalowego oraz uwzględnieniu stochastycznych aspektów związanych z chłodzeniem po procesie formowania na gorąco. Kluczowym celem było uniknięcie ograniczeń obecnych modeli poprzez operowanie na rozkładach cech mikrostrukturalnych, co umożliwiło dokładniejsze przewidywanie właściwości materiałów. W ramach badań dążyliśmy do wykorzystania histogramów rozmiaru ziarna oraz gęstości dyslokacji jako danych wejściowych. Następnie wdrożono rozwiązanie oparte o analizę odwrotną, gdzie problem przekształcony został w zadanie optymalizacyjne. Wykonane optymalizacje oraz testy numeryczne miały na celu zidentyfikowanie i określenie optymalnych parametrów modelu. Badanym materiałem była stal S355J2, charakteryzująca się złożoną mikrostrukturą składającą się z różnych faz. Dane wejściowe zostały pozyskane z testów dylatometrycznych, obejmujących różne rozmiary ziarna oraz 12 zróżnicowanych prędkości chłodzenia.

2. Najważniejsze wyniki

Przeprowadzone optymalizacje doprowadziły do znalezienia współczynników modelu, co zaowocowało precyzyjnym odwzorowaniem danych eksperymentalnych, zarówno pod względem temperatur, jak i ułamków objętościowych poszczególnych faz. Wyniki zaprezentowane zostały w postaci histogramów oraz porównania danych z eksperymentu i odpowiedzi z modelu na rysunku 1.



Rys. 1. Wybrane przykłady porównania zmierzonych i obliczonych histogramów udziałów objętościowych ferrytu (a), perlitu (b) i bainitu (c) dla szybkości chłodzenia 15°C/s.



Rys. 2. Porównanie zmierzonych (symbole pełne) i obliczonych dla optymalnych współczynników (symbole otwarte z liniami) temperatur przemian fazowych (a) i ułamków objętościowych (b).

3. Dyskusja i wnioski

Analizując różne metody optymalizacyjne, najlepsze wyniki w rozwiązywaniu problemu uzyskano przy użyciu algorytmów genetycznych, w szczególności ewolucji różnicowej. Przy przeprowadzanych optymalizacjach na wartościach średnich istotnym czynnikiem było zastosowanie odpowiednich zmiennych wag w funkcji celu, aby uzyskać możliwie najlepsze odwzorowanie danych eksperymentalnych. Powstały model przemian fazowych jest znacznie bardziej kosztowny obliczeniowo, niż miało to miejsce przy zastosowaniu zmiennych deterministycznych. Aby wyniki modelu były możliwie najbliższe pożądanym należało stosować przynajmniej 10000 punktów Monte Carlo. Pojawiającymi się problemami było utykanie w minimach lokalnych, co zostało rozwiązane poprzez wykonywanie wielu optymalizacji, a następnie braniu najlepszych osobników z każdej optymalizacji, celem badania sąsiedztwa danego rozwiązania w poszukiwaniu lepszych rozwiązań. Zastosowano optymalizację zarówno dla wartości średnich, jak i histogramów, osiągając udane odwzorowanie danych eksperymentalnych w obu podejściach. Podczas optymalizacji z użyciem histogramów skutecznym podejściem było wykorzystanie hybrydowej funkcji celu, opartej na obliczaniu różnic między ułamkami objętościowymi za pomocą metody Earth Movers Distance (EMD), co doprowadziło do lepszego odwzorowania danych eksperymentalnych. Wieloetapowe podejście do optymalizacji opierające się na wstępnym zawężeniu zakresów podczas optymalizacji globalnej dla każdej z temperatur i każdego ułamka objętościowego z osobna okazało się najlepszym obecnie podejściem.

4. Podziękowania

Wsparcie finansowe Narodowego Centrum Nauki w Polsce (NCN), projekt nr. 2021/43/B/ST8/01710.

5. Literatura.

- [1] Klimczak K., Oprocha P., Kusiak J., Szeliga D., Morkisz P., Przybyłowicz P., Czyżewska N., Pietrzyk M., Inverse problem in stochastic approach to modelling of microstructural parameters in metallic materials during processing, *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, Article ID 9690742, doi.org/10.1155/2022/9690742.
- [2] Szeliga D., Czyżewska N., Klimczak K., Kusiak J., Kuziak R., Morkisz P., Oprocha P., Pidvysotsk'yy V., Pietrzyk M., Przybyłowicz P., Formulation, identification and validation of a stochastic internal variables model describing the evolution of metallic materials microstructure during hot forming, *International Journal of Material Forming*, 15, 2022, 53, doi.org/10.1007/s12289-022-01701-8.
- [3] Szeliga D., Czyżewska N., Klimczak K., Kusiak J., Kuziak R., Morkisz P., Oprocha P., Pietrzyk M., Poloczek Ł., Przybyłowicz P., Stochastic model describing evolution of microstructural parameters during hot rolling of steel plates and strips, *Archives of Mechanical and Civil Engineering*, 22, 2022, 239, doi.org/10.1007/s43452-022-00460-2.
- [4] Pietrzyk M., Madej Ł., Rauch Ł., Szeliga D., *Computational Materials Engineering: Achieving high accuracy and efficiency in metals processing simulations*, Butterworth-Heinemann, Elsevier, Amsterdam, 2015.
- [5] Szeliga D., Czyżewska N., Klimczak K., Kusiak J., Morkisz P., Oprocha P., Pietrzyk M., Przybyłowicz P., Sensitivity analysis, identification and validation of the dislocation density based model for metallic materials, *Metallurgical Research and Technology*, 118, 2021, 317, doi 10.1051/metal/2021037.

STRUKTURA SLABA ZE STALI WYSOKOKRZEMOWEJ ODLEWANEGO W SPOSÓB CIĄGŁY

HIGH-SILICON STEEL CONTINUOUSLY CAST SLAB STRUCTURE

Ścibisz K.^{1,2*}, Krawczyk J.³

¹ ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Krakowie ul. Tadeusza Sendzimira 1, 31-752 Kraków, Polska

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Szkoła Doktorska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

³ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: kamila.scibisz@arcelormittal.com

1. Wprowadzenie i metodyka badań

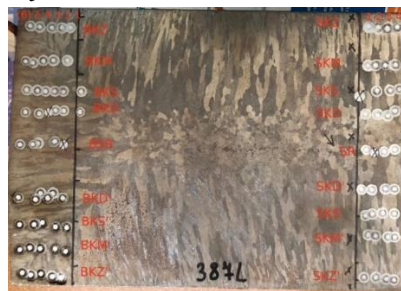
Stale wysokokrzemowe o zawartości Si około 3% są wykorzystywane do produkcji stali elektrotechnicznych. Proces produkcyjny oparty jest na uzyskaniu pożądanej tekstury tzw. tekstury Gossa. Jednym z wielu czynników wpływających na tworzenie się tekstury {110} <001> jest odpowiednia ilość inhibitora AlN zapewniającego kontrolę rozrostu ziaren w procesie wtórnej rekrytalizacji [1]. AlN podobnie jak inne wtrącenia niemetaliczne powstają wcześniej już na etapie krystalizacji. Ilość i jakość wtrąceń niemetalicznych jest jednym z czynników determinujących jakość wyrobu końcowego [2]. W procesie ciągłego odlewania stali następuje nierównomierny rozkład węgla, azotu i pierwiastków stopowych jak i zanieczyszczeń nazywany segregacją. Zapobieganie makrosegregacji ma kluczowe znaczenie dla produkcji wysokiej jakości stali. Jednym z pierwiastków silnie segregujących jest węgiel [3]. Ustalenie segregacji z uwzględnieniem miejsc koncentracji wydzielen wtrąceń niemetalicznych w tym AlN ma istotne znaczenie w zakresie kształtowania jakości wyrobu, sposobu pobierania prób oraz analizy własności magnetycznych finalnego wyrobu. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę struktury slaba uzyskanego w procesie odlewania ciągłego, zbadano jakościowy rozkład segregacji składu chemicznego, badania uzupełniono analizą zmiany parametrów magnetycznych poprzez badania szumów Barkhausena.

2. Najważniejsze wyniki

Badany materiał charakteryzuje się wyraźnie odznaczonymi strefami kryształów powstałych podczas krzepnięcia stali (rys. 1). Analiza składu chemicznego (rys. 2) na przekroju slaba potwierdziła segregację C do środka slaba jak również segregację Si w strefie kryształów równoosiowych. Al i Cu rozkładają się równomiernie na całej szerokości slaba.



Rys. 1. Obserwacje makroskopowe slaba.



Rys. 2. Rozkład przypaleń na przekroju slaba.

Analizując cały przekrój slaba stwierdzono, że poziom szumów magnetycznych Barkhausena (parametr MP) jest wyższy w przypadku pomiarów w kierunku poprzecznym (rys. 3). W kierunku normalnym trudniej ulegają przemieszczaniu ścianki Blocha o czym świadczą niższe wartości parametru MP (rys. 4).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	378	415	356	320	400	435	478	401	316	364	310	221	235	228	192	265
2	302	235	414	443	452	379	282	364	278	377	311	229	230	203	215	236
3	249	205	301	466	306	310	250	318	240	220	184	212	187	200	194	266
4	287	247	303	314	390	280	351	294	241	264	214	191	198	197	265	223
5	278	318	252	244	223	306	315	312	247	221	209	230	260	213	199	196
6	302	261	215	169	223	199	220	212	227	256	241	214	203	183	234	184
7	243	195	192	171	247	224	188	199	208	194	218	217	203	199	192	237
8	280	162	172	197	223	191	203	184	218	243	325	262	216	193	260	225
9	170	146	187	210	183	162	258	227	168	214	227	236	249	223	244	211
10	238	172	235	249	216	224	212	368	279	252	212	233	261	224	243	189
11	261	278	299	239	256	325	204	234	283	233	261	226	238	194	198	173

Rys. 3. Rozkład MP na przekroju slaba w kierunku poprzecznym

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	380	212	276	190	169	196	210	161	208	177	170	204	253	232	200	185
2	210	205	180	208	204	157	123	141	146	190	190	170	211	180	180	200
3	236	190	203	165	155	188	162	170	165	165	171	176	222	171	184	184
4	245	180	183	155	190	236	228	212	158	165	143	155	170	178	200	206
5	240	173	176	190	186	187	178	230	231	203	186	163	187	195	208	202
6	240	222	175	180	161	163	200	212	186	192	190	183	156	224	198	210
7	232	168	204	217	190	185	191	189	180	190	175	208	200	210	180	239
8	230	168	133	130	142	160	151	174	148	128	124	180	160	182	197	250
9	218	240	240	180	180	178	189	140	190	134	146	146	160	168	203	220
10	207	198	155	222	181	175	172	156	154	124	155	170	213	249	236	213
11	247	235	209	210	170	169	171	142	155	150	173	173	213	200	200	218

Rys. 4. Rozkład MP na przekroju slaba w kierunku normalnym.

3. Dyskusja i wnioski

Przeprowadzone analizy segregacji węgla i pierwiastków stopowych na przekroju slaba uzupełnione oceną genezy zmian w zakresie segregacji wtrąceń niemetalicznych na szerokości blachy i mogą mieć przełożenie na znaczenie ich występowania w zakresie kształtowania jakości wyrobu końcowego tj. stali elektrotechnicznej. Powstawanie struktury kolumnowej ma wpływ na anizotropię właściwości magnetycznych

Podziękowania

Praca finansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki w ramach V edycji doktoratów wdrożeniowych.

Literatura

- [1] Z. Xia, Y. Kang, Q. Wang.: Developments in the production of grain-oriented electrical steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008).
- [2] X. Zhu, W. Wan, L. Qian, Y. Cai, X. Chen, P. Zhang, G. Huang, B. Liu, Q. Yao, S. Li, Z. Yao.: Research on Intelligent Identification and Grading of Nonmetallic Inclusions in Steels Based on Deep Learning. Micromachines 14 (2), 482 (2023).
- [3] S. Luo, K. Li, W. Wang, M. Zhu.: Numerical simulation of macrosegregation in continuously cast slab with application of S-EMS and MR. Journal of Materials Research and technology 24, 2023, 6893-6907.

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH I ODKSZTAŁCENIA PLASTYCZNEGO CYNKU W MIKROSKALI MEASURING MICROSCALE MECHANICAL PROPERTIES OF ZINC

Wątroba M.^{1,*}, Bednarczyk W.², Tian C.¹, Pratama K.¹, Maćkosz K.¹, Michler J.¹, Schwiedrzik J.¹

¹Empa Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Lab. for Mechanics of Materials and Nanostructures, Switzerland

²Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw, Poland

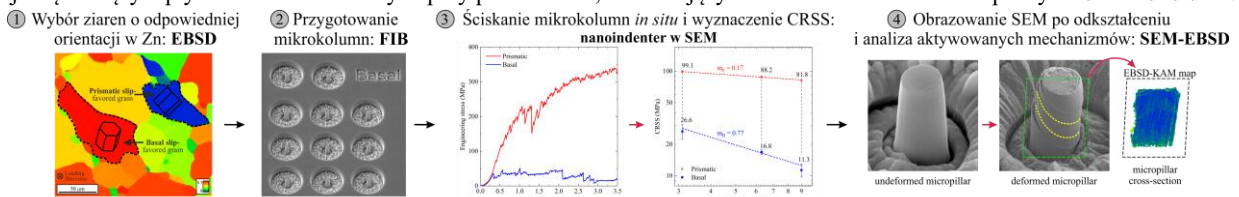
*Kontakt korespondencyjny: e-mail: maria.watroba@empa.ch

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Cynk (Zn) ze względu na biodegradację i optymalną szybkość korozji w środowisku fizjologicznym wykazuje potencjał do zastosowań biomedycznych. Wykorzystanie Zn w stanie litym jest ograniczone ze względu na jego kruchość i niską wytrzymałość. Ponadto, Zn wykazuje silną anizotropię właściwości mechanicznych, która zależy od początkowej tekstury i krytycznych naprężeń ścinających CRSS (*critical resolved shear stresses*) dla danych mechanizmów odkształcenia. Zastosowanie dodatków stopowych i przeróbki plastycznej pozwala na wytworzenie stopów Zn spełniających wymagania mechaniczne dla bioresorbowalnych implantów [1]. Uzyskany efekt umocnienia w stopach Zn jest z reguły wynikiem kilku czynników: wielkości i orientacji ziaren, typu granic ziaren, umocnienia roztworowego, czy obecności faz międzymetalicznych [2]. Zidentyfikowanie dominującego mechanizmu umocnienia z pomocą konwencjonalnych metod badawczych jest utrudnione. Badania mikromechaniczne wewnątrz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM, *scanning electron microscope*) w połączeniu z dyfrakcją elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD, *electron backscattered diffraction*) to idealna metoda do oceny wpływu poszczególnych składników mikrostruktury na właściwości i mechanizmy odkształcenia Zn w mikroskali. Celem badań była analiza wpływu wielkości i orientacji monokrystalicznych i drobnoziarnistych mikrokolumn wykonanych z Zn na mechanizmy odkształcenia i wytrzymałość podczas ściskania. Mikrokolumny o średnicy od 1 μm do 10 μm przygotowano przy użyciu wiązki jonów Ga⁺ w uprzednio wybranych ziarnach o orientacji sprzyjającej aktywacji bazowego lub pryzmatycznego systemu poślizgu. W celu określenia wpływu granic ziaren na właściwości mechaniczne, identyczne mikrokolumny przygotowano w drobnoziarnistym Zn wytworzonym przy użyciu elektrodepozycji (ED). Ściskanie *in situ* mikrokolumn wykonano przy użyciu nanoindentera w szerokim zakresie prędkości odkształcenia. Do obserwacji i analizy odkształconych próbek wykorzystano SEM, analizę EBSD oraz transmisyjną mikroskopię elektronową (TEM).

2. Najważniejsze wyniki

Wartość naprężenia CRSS dla bazowego i pryzmatycznego systemu poślizgu wyznaczono zgodnie z *prawem Schmid*a wykorzystując wartość granicy plastyczności (σ_{YS}) uzyskanej podczas ściskania mikrokolumn, oraz współczynnika m zależnego od orientacji wybranych ziaren oraz kierunku działania obciążenia. Analiza SEM-EBSD na przekroju poprzecznym mikrokolumn po odkształceniu potwierdziła aktywację pojedynczego systemu poślizgu. Wraz ze zmniejszeniem średnicy mikrokolumn zaobserwowano tzw. *size effect*, uzyskując znacznie wyższe wartości σ_{YS} dla próbek monokrystalicznych oraz drobnoziarnistych. Wartość CRSS dla bazowego systemu poślizgu zwiększyła się z 11,3 MPa do 26,6 MPa, a dla pryzmatycznego z 81,8 MPa do 99,1 MPa przy zmniejszeniu średnicy mikrokolumn z 9 μm do 3 μm . Zaobserwowano znikomy wpływ prędkości odkształcenia na mechanizm odkształcenia oraz CRSS [3]. Drobnoziarniste mikrokolumny osiągnęły σ_{YS} na poziomie ok. 875 MPa dla 5 μm oraz 1110 MPa dla 1 μm . Nie zaobserwowano spadku σ_{YS} powyżej 5 μm , co oznacza, że wielkość mikrokolumny przestaje być dominującym czynnikiem wpływającym na właściwości mechaniczne, natomiast kluczowa staje się mikrostruktura w mikrokolumnach. Zanotowano nieco wyższą czułość na prędkość odkształcenia. Szczegółowa analiza Zn po ED wykazała, że mikrostruktura składa się z kolumnowych ziaren silnie zorientowanych w kierunku (10-10), o wielkości < 2,5 μm . Badania TEM ujawniły, że wewnątrz kolumn oraz na granicach występuje dużo nanometrycznych porów, pochodzących prawdopodobnie z procesu ED. Mikroanaliza chemiczna wykazała wzbogacenie w tlen mogący tworzyć ciekłą warstwę tlenku Zn na krawędziach porów. Obserwacje SEM wykazały zmianę charakteru odkształcenia wraz ze zmianą prędkości odkształcenia oraz wielkości mikrokolumn. Wraz ze zmniejszeniem średnicy obserwuje się rosnący wpływ ziaren kolumnowych przy powierzchni, kontrolujących całkowite odkształcenie plastyczne mikrokolumn.



Rys. 1. Etapy wykonania badań mikromechanicznych oraz analizy mechanizmów odkształcenia monokrystalicznych mikrokolumn z Zn.

3. Dyskusja i wnioski

Przeprowadzone badania mikromechaniczne pozwoliły na analizę właściwości mechanicznych i wyznaczenie wartości CRSS, które mogą posłużyć do modelowania odkształcenia plastycznego i właściwości stopów Zn. Potwierdzono efekt *im mniejszy, tym silniejszy* dla monokrystalicznych oraz drobnoziarnistych mikrokolumn. Umocnienie drobnoziarnistych mikrokolumn objawiające się wysoką σ_{YS} zawdzięcza się kolumnowej mikrostrukturze o silnej teksturze i dużemu udziałowi nanometrycznych porów z ciekłą warstwą tlenku Zn na granicach, które stanowią źródło blokowania swobodnego ruchu dyslokacji podczas odkształcenia. Mając na uwadze zastosowanie Zn na implanty, należy podkreślić, że uzyskana nanoporowata mikrostruktura Zn otwiera możliwości na opracowanie materiałów na bazie Zn o kontrolowanej szybkości korozji. Co więcej, ED można wykorzystać do wytworzenia metamateriałów z Zn o dowolnej architekturze 3D.

4. Podziękowania

Badania wykonano w ramach projektu *Swiss Postdoctoral Fellowships nr 217017* finansowanego przez *Swiss National Science Foundation*.

5. Literatura

- [1] H. Yang, et al., B. Jia, Z. Zhang, X. Qu, G. Li, W. Lin, D. Zhu, K. Dai, Y. Zheng, Alloying design of biodegradable zinc as promising bone implants for load-bearing applications, *Nat. Commun.* 11 (2020) 401.
- [2] M. Wątroba, W. Bednarczyk, J. Kawałko, P. Bała, Fine-tuning of mechanical properties in a Zn–Ag–Mg alloy via cold plastic deformation process and post-deformation annealing, *Bioact. Mater.* 6 (2021) 3424–3436.
- [3] W. Bednarczyk, M. Wątroba, J. Kawałko, P. Bała, Determination of room-temperature superplastic asymmetry and anisotropy of Zn-0.8Ag alloy processed by ECAP, *Mater. Sci. Eng. A.* 759 (2019) 55–58.

BADANIE HYPERPRZESTRZENI WYSOKOTOPLIWYCH STOPÓW O DUŻEJ ENTROPII PRZY UŻYCIU WYSOKPRZEPUSTOWYCH METOD INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ ORAZ UCZENIA MASZYNOWEGO

INVESTIGATION OF REFRACTORY HIGH-ENTROPY ALLOYS USING HIGH-THROUGHPUT MATERIAL SCIENCE METHODS AND MACHINE LEARNING

Wieczerek K.^{1,*}, Widmer R.¹, Groetsch A.¹, Schwiedrzik J.¹, Michler J.¹

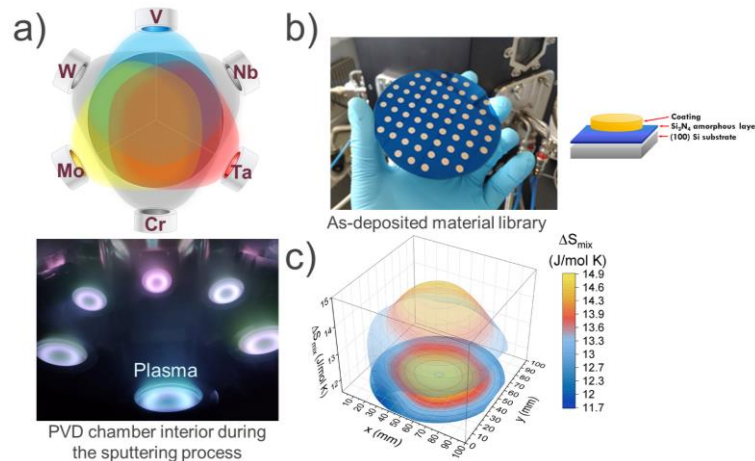
¹Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory for Mechanics of Materials and Nanostructures, CH-3602 Thun, Switzerland

*krzysztof.wieczerek@empa.ch

Istnieje duże zapotrzebowanie na stopy metaliczne o dużej wytrzymałości oraz odporności na korozję w wysokich temperaturach dla różnych dziedzin przemysłu, takich jak lotnictwo, energetyka czy przemysł chemiczny. Wraz z rozwojem nowych technologii rośnie zapotrzebowanie na materiały metaliczne, które mogą pracować w wyższych temperaturach niż obecne nadstopy na bazie niklu. Wysokotopliwe stopy o wysokiej entropii (RHEAs), które pojawiły w ostatniej dekadzie w świecie inżynierii materiałowej, z uwagi na wysokie temperatury topnienia oraz dużą żarowytrzymałość, są bardzo obiecującą grupą materiałów do pracy w ekstremalnych warunkach.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione wyniki systematycznego badania hyperprzestrzeni RHEAs w systemie Cr-Mo-Nb-Ta-V-W. W ramach tego badania wytworzono bibliotekę materiałową (ML) za pomocą technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) na waflu krzemowym z gradientem każdego z pierwiastków w zakresie 30-45 at.%. Zakładając, że stopy powinny różnić się od siebie o 1 at. %, przekłada się to na ~35,000 stopów. Wyprodukowanie tej samej ilości stopów, klasycznymi metodami syntezy, tj. topienie łukowe czy też przy użyciu metalurgii proszków, w tempie 1 stop/dzień zajęłoby ~136 lat. Proces współrozpylania magnetronowego został skalibrowany tak, aby uzyskać równomolową kompozycję i maksymalną entropię konfiguracyjną w centrum ML (Rys. 1).

W pierwszej fazie badania wybrane regiony ML zostały scharakteryzowane za pomocą fluorescencji rentgenowskiej w celu określenia składu chemicznego. Badania struktury zostały przeprowadzone przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej. Uzyskane dyfraktogramy zostały poddane szczegółowej analizie za pomocą parametrycznego dopasowania metodą *Le Baila*, będącego techniką dopasowania całego profilu dyfrakcyjnego, która pozwala na określenie właściwości materiałów krystalicznych, takich jak parametry sieci krystalicznej i rozmiar krystalitów. Następnie zastosowano wysokoprzepustową metodę nanoindentacji, aby określić właściwości mechaniczne. W ten sposób utworzona baza danych materiałowych została użyta do szkolenia algorytmu sieci neuronowej (ANN) w celu przewidzenia właściwości mechanicznych stopów, które wykraczają poza przestrzeń kompozycyjną badanej ML.



Rysunek 1. a) Schematyczne przedstawienie procesu syntezy biblioteki materiałowej Cr-Mo-Nb-Ta-V-W. b) Biblioteka materiałowa po syntezie. c) Dystrybucja entropii konfiguracyjnej ΔS_{mix} w badanej ML - maksymalna entropia została uzyskana w centrum wafla krzemowego, co odpowiada położeniu stopu o równomolowej kompozycji.

ODPORNOŚĆ WARSTW KRZEMKOWO-ALUMINIDKOWYCH WYTWARZANYCH METODĄ ZAWIESINOWĄ NA STALI X3CrTi17 W ATMOSFERZE AZOTUJĄCEJ

THE RESISTANCE OF Al-Si COATINGS OBTAINED BY SLURRY METHOD ON X3CrTi17 STAINLESS STEEL IN NITRIDING ATMOSPHERE

Wierzbowska K.^{1,*}, Kochmańska A.², Kochmański P.³

^{1,2,3} Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki,
ul. Aleja Piastów 19, 70-310 Szczecin, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: karolina.wierzbowska@zut.edu.pl, agnieszka.kochmanska@zut.edu.pl

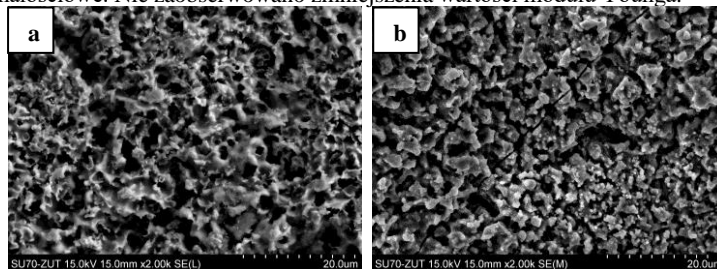
1. Wprowadzenie i metodyka badań

Austenityczne stale o wysokim udziale procentowym niklu są najczęściej spotykanym materiałem konstrukcyjnym wykorzystywanym w instalacjach do obróbki cieplnej m.in. do budowy retort pieców, w których przeprowadzany jest proces azotowania [1][2]. Ciągłe ekspozowanie materiału na atmosferę redukującą, gdzie jednocześnie panuje wysoka temperatura powoduje, że materiał ulega korozji wysokotemperaturowej, skutkiem czego jest częsta wymiana elementów instalacji [3]. Z uwagi na zainteresowanie ze strony przedsiębiorstw rozwiązaniem tego problemu oraz znikomą ilością publikacji na temat odporności warstw i powłok ochronnych w atmosferze azotującej zdecydowano się wytworzyć warstwy krzemkowo-aluminidkowe metodą zawiesinową na ferrytycznej stali X3CrTi17 i zbadać ich odporność w atmosferze redukującej ekspozując próbki w temperaturze 575°C przez 800h w atmosferze amoniaku [4].

Warstwy wytworzono w trzech różnych temperaturach (700, 800 oraz 1000°C) w czasie 1, 2 lub 6h. W celu charakterystyki oraz identyfikacji związków występujących na powierzchni wykonanych próbek zastosowano analizę rentgenowską (XRD) oraz technikę skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) z zastosowaniem mikroanalizy rentgenowskiej (EDS). Na podstawie wykonanych zdjęć techniką SEM na przekroju próbek dokonano również pomiarów grubości uzyskanych warstw oraz przeprowadzono analizę rozkładu pierwiastków. Ocenę właściwości mechanicznych na przekroju próbek dokonano na podstawie wyników mikrotwardości przeprowadzonych metodą nanoidentacji z wykorzystaniem wglębniaka Berkovicha. Odporność próbek na korozję wysokotemperaturową sprawdzano co 200h. Ostateczną ocenę odporności przeprowadzono po 800h na podstawie wyników analizy rentgenowskiej (XRD) oraz obserwacji mikroskopowych techniką SEM z zastosowaniem mikroanalizy rentgenowskiej (EDS) na powierzchni próbek.

2. Najważniejsze wyniki

Mikroanaliza rentgenowska wykazała, że stosując temperaturę wytwarzania 700°C i wygrzewając próbki zaledwie przez 1h na powierzchni próbek tworzy się faza Al₅Fe₂, która wykazuje odporność na azotowanie przez co najmniej 800h. Przy zastosowaniu temperatury wytwarzania 1000°C, niezależnie od czasu wygrzewania, dominuje w warstwie faza AlFe, która nie chroni podłoża przed tworzeniem się azotków żelaza. Badania przeprowadzone na przekroju wykazały, że tworzenie się faz międzymetalicznych w temperaturze 700°C ma charakter dyfuzji reakcyjnej. Analiza grubości wytworzonych warstw oraz przyrostu masy próbek pomogła w określeniu korelacji, pomiędzy żaroodpornością, a parametrami wytwarzania. Wytworzone warstwy charakteryzują się większą twardością, niż podłoże stalowe, co potwierdza, że naniesione warstwy podwyższają właściwości wytrzymałościowe. Nie zaobserwowano zmniejszenia wartości modułu Younga.



Rys. 1. Mikrostruktura (SEM) warstwy Al-Si a) wytworzonej na materiale X3CrTi17 przy zastosowaniu 700°C wygrzewanej w czasie 1h, b) po 800h pracy w atmosferze azotującej.

3. Dyskusja i wnioski

Wytworzone warstwy aluminidkowe na stali X3CrTi17 stanowią barierę w atmosferze azotującej podwyższając tym samym żaroodporność użytego materiału. Zaprezentowane wyniki znajdują potencjalne zastosowanie w przemyśle, gdzie drogie stale austenityczne mogą zostać zastąpione wykorzystaną stalą ferrytyczną z nałożoną warstwą Al-Si, a tym samym przedłużona może być żywotność elementów pracujących w atmosferze zawierającej amoniak.

4. Literatura

1. Christ, H.J.; Chang, S.Y.; Krupp, U. Thermodynamic characteristics and numerical modelling of internal nitridation of nickel-base alloys. *Corros. by Carbon Nitrogen Met. Dusting, Carburisation Nitridation* **2007**, 271–285, doi:10.1533/9781845693350.271.
2. Bhuvaneshwaran, N.; Kamachi Mudali, U.; Shankar, P. Characterization of aluminide coatings formed by diffusion alloying on nitrogen-containing type 316L stainless steels. *Scr. Mater.* **2003**, 49, 1133–1138, doi:10.1016/S1359-6462(03)00430-5.
3. Mudgal, D.; Singh, S.; Prakash, S. Hot Corrosion Behavior of Some Superalloys in a Simulated Incinerator Environment at 900 °C. *J. Mater. Eng. Perform.* **2014**, 23, 238–249, doi:10.1007/s11665-013-0721-x.
4. Kochmańska, A. Hot corrosion resistance properties of Al-Si coatings obtained by slurry method. *Defect Diffus. Forum* **2012**, 326–328, 273–278, doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.273.

BADANIA EBSD STRUKTURY DOMENOWEJ FAZ MIĘDZYMETALICZNYCH Cu-Sn PO PRZEMIANACH FAZOWYCH EBSD INVESTIGATION OF DOMAIN STRUCTURES AFTER PHASE TRANSFORMATIONS IN Cu-Sn INTERMETALLICS

Winkelmann A. ^{1,*}

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica, Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii, al. Mickiewicza 30, 30-059
Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: Winkelmann@agh.edu.pl

Cu₆Sn₅ jest ważnym związkiem międzymetalicznym powstającym w połączeniach lutowanych pomiędzy materiałem przewodnika na bazie Cu i lutowiem na bazie Sn.

Wykazano, że po uporządkowaniu bogatej w Cu fazy międzymetalicznej Cu₆Sn₅, nieuporządkowana faza η przekształca się w jednoskośną fazę η'' z charakterystyczną mikrostrukturą składającą się z 6 różnych orientacji domen na jedną orientację macierzystą η. Analiza obrazów dyfrakcyjnych Kikuchiego w dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) została wykorzystana do ujawnienia mikrostruktury domenowej poprzez dopasowanie obrazów eksperymentalnych EBSD do dynamicznych symulacji dyfrakcji elektronowej.

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2020/37/B/ST5/03669 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

ANALIZA LOKALNEJ ZMIANY PARAMETRÓW SIECI PRZY WYKORZYSTANIU BEZWZORCOWEJ TECHNIKI ANALIZY OBRAZU EBSD

ANALYSIS OF LOCAL LATTICE PARAMETER CHANGE USING TEMPLATE-FREE EBSD IMAGE ANALYSIS TECHNIQUE

WÓJCIAK K.^{1,*}, TOKARSKI T.¹, CIOS G.¹, NOLZE G.^{2,3}

¹ Akademia Górniczo – Hutnicza, Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska, ² Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany, ³ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie, Brennhausgasse 16, 09599 Freiberg, Germany

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: kwojciak@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie i metodyka badań

Konwencjonalne podejście analizy dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) opiera się na wykrywaniu linii Kikuchiego z wykorzystaniem transformacji Hougha. Każda faza reprezentowana jest przez własny zestaw kątów międzypłaszczyznowych, które to porównywane są z wartościami eksperymentalnymi uzyskanymi z obrazu dyfrakcyjnego. Obecnie w celu poprawy dokładności i precyzji EBSD, stosuje się dwie główne techniki, a mianowicie EBSD o wysokiej rozdzielczości (HR-EBSD) [1] i dopasowywanie wzorców (Pattern Matching) [2]. Obie metody opierają się na zdefiniowanym wzorcu, działającym jako punkt odniesienia dla techniki korelacji obrazu cyfrowego. Jednym z najnowszych zastosowań wspomnianych technik jest mapowanie lokalnej tetragonalności martenzytu [3,4].

W pracy przedstawiono oryginalne podejście do rekonstrukcji sieci krystalicznej z pojedynczego obrazu dyfrakcyjnego. W porównaniu z poprzednio prezentowanymi metodami, do analizy obrazu dyfrakcji nie potrzebujemy bazy danych, a znając centrum projekcji (tzw. projection center PC) jesteśmy w stanie wyodrębnić parametry sieci bez uprzedniej informacji o fazie.

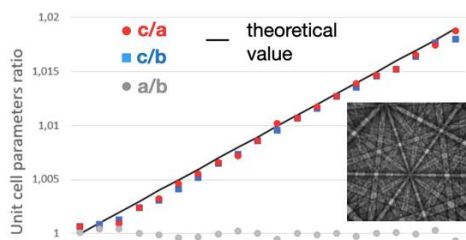
Algorytm ręcznej lub półautomatycznej rekonstrukcji sieci został już z powodzeniem zastosowany w oprogramowaniu CALM [5-7]. Do rekonstrukcji możliwych pozycji środków pasm (śladów płaszczyzn krystalograficznych) wykorzystuje cztery ręcznie wyprowadzone ślady. Podczas rekonstrukcji nieistniejące pasma Kikuchi są odfiltrowywane poprzez analizę cech obrazu dyfrakcyjnego przedstawionego w postaci projekcji Funka i/lub profili pasm. Kolejnym krokiem jest poszukiwanie pasm, obliczenie wektorów sieci odwrotnej i ostatecznie rekonstrukcja sieci Bravais'go.

Nowa metoda została sprawdzona dla materiałów charakteryzujących się ciągłą zmianą metryki sieci oraz w przypadku mapowania lokalnej zmiany tetragonalności czy też ortogonalności.

2. Najważniejsze wyniki

Mapowanie tetragonalności

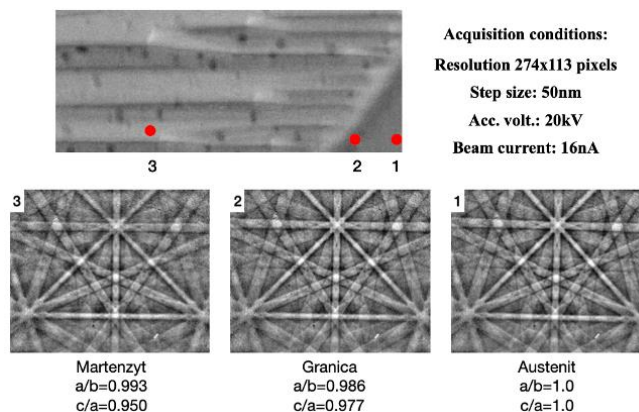
W celu przetestowania jakości algorytmu przygotowano kilka zestawów symulowanych patternów. Zbadano różne czynniki wpływające na wyniki, a mianowicie rozdzielczość wzoru, szum i liczbę pasm użytych do optymalizacji położenia sieci. Przykład przeprowadzonej analizy dla wzoru wolnego od szumów o niskiej rozdzielczości przedstawiono na rys.1. Punkty na wykresie przedstawiają obliczony stosunek parametrów sieci, podczas gdy linia ciągła pokazuje idealny (dla symulowanych obrazów dyfrakcji) stosunek tetragonalności.



Rys.1. Analiza stosunku tetragonalności dla symulowanego obrazu dyfrakcji 125 x 125 pikseli

Analiza eksperymentalna

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki analizy lokalnych zmian sieci krystalicznej w stopie NiMnGa.



Rys.2. Obraz SEM granicy faz austenit-martenzyt w stopie NiMnGa wraz z zaznaczonymi obszarami zebrania obrazów dyfrakcyjnych; 1 – austenit, 2 – granica, 3 – martenzyt

3. Dyskusja i wnioski

Rozwijana bezwzorcowa technika analizy obrazu EBSD została z powodzeniem zastosowana w przypadku analizy lokalnej zmiany sieci krystalicznej.

1. Mapowanie tetragonalności

- Algorytm działa poprawnie dla różnej liczby śladów płaszczyzn. Tetragonalność może być mapowana z dokładnością do 0,03%.
- Testy przeprowadzone na różnych rozdzielczościach obrazów dyfrakcyjnych wykazują zbliżoną precyzję obliczania parametrów sieci, jak w przypadku wyników dotyczących liczby śladów płaszczyzn. Proponowany algorytm jest zatem bardziej odpowiedni dla obrazów o niższej rozdzielczości, co przynosi korzyści w postaci szybkiej akwizycji i niewielkich wymagań co do pamięci.
- Wprowadzenie szumu do obrazu dyfrakcyjnego wykazuje znaczne pogorszenie precyzji algorytmu.

2. Analiza eksperymentalna

W przypadku analizy eksperymentalnej można spodziewać się gorszej precyzji i dokładności ze względu na efekty excess-deficiency czy też nierównomierne tło, niemniej jednak zaproponowany algorytm został z powodzeniem zastosowany w przypadku układów wykazujących zmienną rozpuszczalność składników stopowych jak i w przypadku mapowania ortogonalności stopu NiMnGa.

4. Podziękowania

Podziękowania dla Aimo Winkelmana za pomoc w przygotowaniu patternów symulowanych dynamicznie oraz Roberta Chulista za próbkę NiMnGa potrzebną do analiz eksperymentalnych.

5. Literatura

- [1] Britton B, Holton I, Meaden G and Dingley D 2013 *Microsc. Anal.* **27**(4)
- [2] Winkelmann A, Jablon B M, Tong V S, Trager-Cowan C and Mingard K P 2020 *J. Microscopy* **277** 12870
- [3] Winkelmann A, Nolze G, Cios G and Tokarski T 2018 *Phys. Rev. Mater.* **2** 123803
- [4] Adams D, Miles M P, Homer E R, Brown T, Mishra R K and D T Fullwood 2020 *J. Microscopy* **282** 12980
- [5] Nolze G, Tokarski T, Rychłowski Ł, Cios G and Winkelmann A 2021 *J. Appl. Crystall.* **54** 1012-1022
- [6] Nolze G, Tokarski T, Rychłowski Ł 2023 *J. Appl. Crystall.* **56**(2)
- [7] www.calm-ebds.com

NADCHODZĄCE KONFERENCJE

Metal Forming 2024
15-18 września 2024
Kraków, Polska
www.metalforming.agh.edu.pl

Electrospin 2024
25-28 czerwca 2024
Kraków, Polska
www.electrospin2024.agh.edu.pl