

METODY BADANIA POROWATOŚCI ODLEWANYCH CIŚNIENIOWO WYROBÓW ZE STOPU MAGNEZU AM50

POROSITY TESTING METHODS OF MAGNESIUM ALLOY AM50 MADE BY CASTING PRESSURE

Liwia Sozańska

Janusz Mazurkiewicz

Politechnika Śląska

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

ul. Konarskiego 18A

44-100 Gliwice

e-mail: liwia.sozanska@polsl.pl

e-mail: janusz.mazurkiewicz@polsl.pl

Abstract: There is an increasing interest in casting pressure elements in the automotive and household industry. Mechanical properties, implementation precision and quality play major role here. Unfortunately, this manufacturing technology is accompanied with disadvantageous features of the material structure as porosity, which must be controlled during production. On the basis of comparative studies of three selected research methods the most optimal research method for this group of products and materials was selected. It is a technique based on acoustic microscopy which, allows for the research of large components in the X and Y axes and a relatively high Z-axis. The research enables an analysis of all components without necessity of cutting a product into smaller elements subjected to separate analysis.

Keywords: magnesium alloys, pressure casting, porosity, acoustic microscopy, X-ray tomography.

Wprowadzenie

Obecnie ciągle wzrasta zainteresowanie stopami lekkimi wśród materiałów konstrukcyjnych stosowanych do budowy samolotów oraz w przemyśle motoryzacyjnym, których użycie ma na celu zmniejszenie masy konstrukcji oraz oszczędność energii. Ze względu na niską gęstość 1,75-1,85 Mg/m³, wysoką wytrzymałość, dobre odprowadzanie ciepła i tłumienie drgań stopy magnezu mają szerokie zastosowanie, ponieważ są najlżejsze wśród wszystkich metalowych materiałów konstrukcyjnych. Stopy magnezu dzieli się na odlewnicze i przeznaczone do przeróbki plastyczne. Stosując odpowiednią obróbkę cieplną stopów magnezu możliwe jest uzyskanie różnych kombinacji własności mechanicznych. Odlewnicze stopy magnezu zawierają więcej dodatków stopowych niż stopy do przeróbki plastycznej. Ich wytrzymałość na rozciąganie wynosi $R_m \approx 280$ MPa, natomiast granica plastyczności $R_{p0,2} \approx 160$ MPa [1, 2, 3]. Odlewianie pod ciśnieniem (wtryskowe), do których stosowane są metalowe formy jest jedną z metod odlewania stopów magnezu. Płynny metal wtłaczany jest pod ciśnieniem do chłodzonej wodą metalowej formy. Metoda ta posiada wiele zalet m.in. uzyskanie gładkiej powierzchni, dokładne wymiary odlewu oraz

jednorodność odlewu. Jest ona odpowiednia dla stopów magnezu, ponieważ:

- stopy magnezu są rzadkoplątne, dzięki czemu możliwe jest odlanie cienkościennych (grubość ścianek < 1 mm) i skomplikowanych odlewów,

- niskie ciepło właściwe magnezu - szybkie krzepnięcie, powoduje drobnoziarnistość mikrostruktury, możliwe są szybkie cykle produkcyjne oraz zużycie form jest mniejsze,

- podczas odlewania stopów magnezu żelazo, które wchodzi w skład materiału formy jest słabo rozpuszczalne [3, 4].

Do odlewania ciśnieniowego stosowane są maszyny zimno-komorowe oraz gorąco-komorowe [3, 4].

Do wad odlewów ciśnieniowych zaliczyć można porowatość, niedolewy, pęcherze, przywarcie do formy czy pęknięcia. Czynnikiem, który w dużej mierze wyznacza jakość odlewu jest porowatość. Najczęstszą przyczyną powstawania tej wady są wtrącenia fazy gazowej, do innych przyczyn jej tworzenia zaliczyć można źle dobrany układ wlewowy, niewłaściwe odpowietrzenie formy, mała prędkość odlewania, zbyt krótka droga tłoka, zbyt małe ciśnienie doprasowania i niska temperatura odlewania [4, 5, 6].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki optymalizacji metody badania porowatości odlewanych

ciśnieniowo stopów magnezu wyrobów o dużej powierzchni dla krajowego przemysłu motoryzacyjnego. Niestety nie ma metod badania porowatości na tyle uniwersalnych, aby można je było zastosować do wszystkich materiałów i wyrobów. Najczęściej należy wykonać analizę wad i zalet każdej z nich pod kątem technologii, konkretnego zastosowania i oczekiwań producenta bezpośrednio zainteresowanego przede wszystkim w minimalizacji kosztów i maksymalizacji wydajności, co często jest sprzecznym oczekiwaniem. W pracy zaprezentowano analizę trzech metod badania porowatości takich jak:

- analiza obrazu zglądów metalograficznych pod kątem udziału objętościowego porów w strukturze,
- analiza udziału objętościowego porów z wykorzystaniem ultradźwiękowej mikroskopii akustycznej
- analiza udziału objętościowego porów z wykorzystaniem tomografii rentgenowskiej.

Rozdzielczość obrazowania wad wyżej wymienionymi metodami jest zadawalająca i wystarczająca dla wad typu pory i mikropory. W artykule wskazano także wady i zalety analizowanych metod badawczych w odniesieniu do konkretnego przypadku, a także zagadnień związanych z technologią odlewania ciśnieniowego.

Materiał do badań, metodyka badań

Badanym wyrobem były odlewy ciśnieniowe wykonane z odlewniczego stopu magnezu AM50, którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1. Materiał dostarczono w postaci ożebrowanej płyty stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym o wymiarach 1267 x 500 mm i grubości od 1,55 mm do 55 mm. Parametry procesu podano w tabeli 2.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu magnezu AM50 [7].

Skład chemiczny w % mas.	
pierwiastek	zawartość
Mg	reszta
Al	5,5
Zn	0,2
Mn	0,1
Si	0,1
Fe	0,005
Cu	0,01
Ni	0,002

Tab. 2. Parametry odlewania ciśnieniowego stopu magnezu AM50.

Parametr		Wartość
Szybkość tłoka prasującego	1 faza ze stałą szybkością (z pompą)	80%
	1 faza ze zwiększoną prędkością (z akumulatorem)	30%
	1 faza (z rampy)	70%
	2 faza	75-85%
Temperatura ciekłego metalu		680-720°C
Temperatura formy		180-200°C
Droga tłoka	1 faza	150 mm
	2 faza	510 mm
Prędkość odlewania		8,5-9 m/s
Ciśnienie doprasowania		50 bar
Smarowanie tłoka		granulat grafitowy

W celu zbadania porowatości zastosowano trzy zróżnicowane techniki badawcze:

I - mikroskopię świetlną - badania wykonano z wykorzystaniem zautomatyzowanego mikroskopu metalograficznego AxioObserver firmy Zeiss sprzężonego z systemem analizy obrazu AxioVision firmy Zeiss przy

powiększeniu od 25-1000x (rys. 1a). Do analizy wybrano obszary o wielkości zależnej od grubości elementów i ich dostępnej powierzchni. Wykonano pomiary parametrów stereologicznych analizowanych struktur:

- udział procentowy porów [%],

- średnica ekwiwalentna największego pora w obszarze referencyjnym ϕ [mm],
- liczba porów zidentyfikowanych w obszarze referencyjnym.

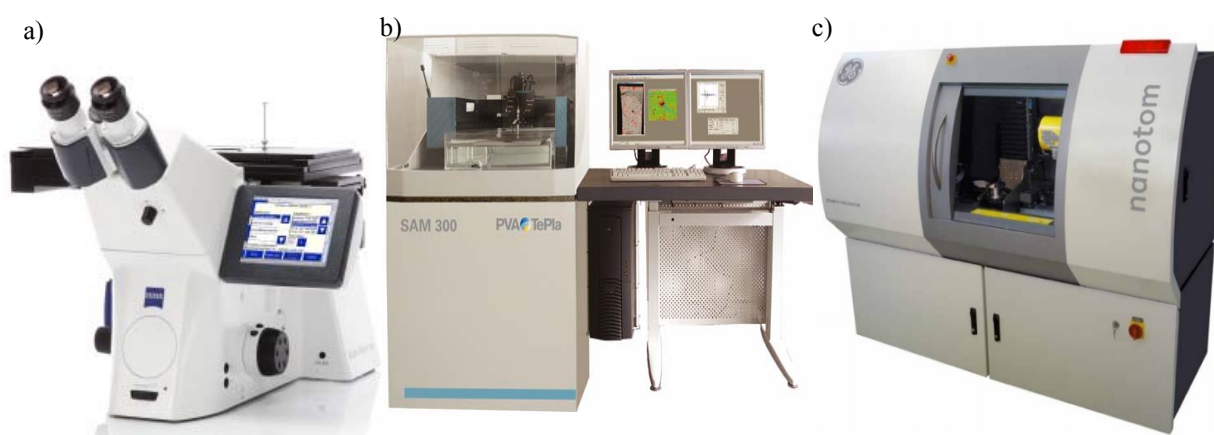
Z dużego odlewu wycięto próbki o wielkości stanowiącej mniej niż 0,5% powierzchni całkowitej odlewu. Próbki do badań pobrano piłą z tarczą ścierną z SiC do stopów aluminium o wielkości nie większej niż 30 x 30 x 20 mm, które zainkludowano w żywicy akrylowej, a następnie szlifowano i polerowano z zastosowaniem zawieszin diamentowych.

II - mikroskopię akustyczną - badania wykonano z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu akustycznego SAM 300 HD firmy PVA TePla Analytical Systems GmbH (rys. 1b). Do badań wykorzystano system HiSA, utrzymujący stałą odległość od próbki oraz ostrość na

całej powierzchni próbki. Zastosowano trzy metody pomiaru:

- A-scan - wykres intensywności do czasu,
- C-scan - obraz jednej wybranej warstwy w próbce,
- X-scan - obrazy multi warstw próbki.

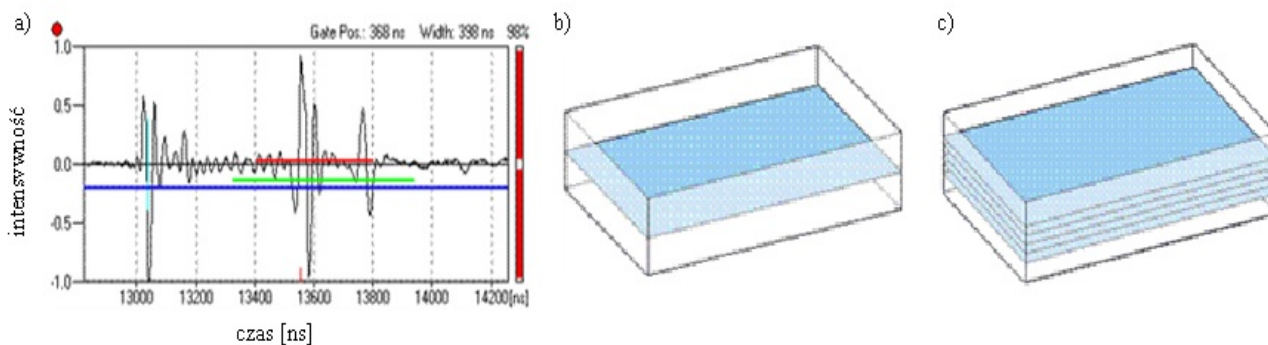
Pomiary wykonano z rozdzielczością 25 μm , maksymalne rozmiary próbek uzależnione są od zastosowanego urządzenia w tym przypadku badano próbki o wymiarach maksymalnych 420 x 420 x 55mm. Długość ogniskowej podczas skanowania próbki wynosiła 20 mm, natomiast częstotliwość 25 MHz. Zastosowano trzy metody pomiaru: A-scan - wykres intensywności do czasu, (rys. 2a), C-scan - obraz jednej specyficznej warstwy w próbce (rys. 2b) oraz X-scan - obraz wielu warstw próbki (rys. 2c).



Rys. 1. a) mikroskop świetlny AxioObserver firmy Zeiss [8], b) skaningowy mikroskop akustyczny SAM 300 HD firmy PVA TePla Analytical Systems GmbH [9], c) nanotomograf Nanotom S firmy General Electric [10].

III - tomografię rentgenowską - badania wykonano z wykorzystaniem nanotomografu Nanotom S firmy General Electric (rys. 1c), wyposażonego w lampę rentgenowską o mocy 57 W zasilaną napięciem do 180 kV. Technika ta pozwala na uzyskanie szczegółowych informacji o struk-

turze wewnętrznej badanego obiektu np. morfologii defektów. Pomiary wykonano, ze względu na optymalizację ilości informacji do czasu i jakości obrazowania z rozdzielczością 25 μm , a maksymalne wymiary próbek wynosiły 100 x 100 x 50 mm.



Rys. 2. Tryby skanowania powierzchni a) A-scan, b) C-scan, c) X-scan.

Wyniki badań i ich dyskusja

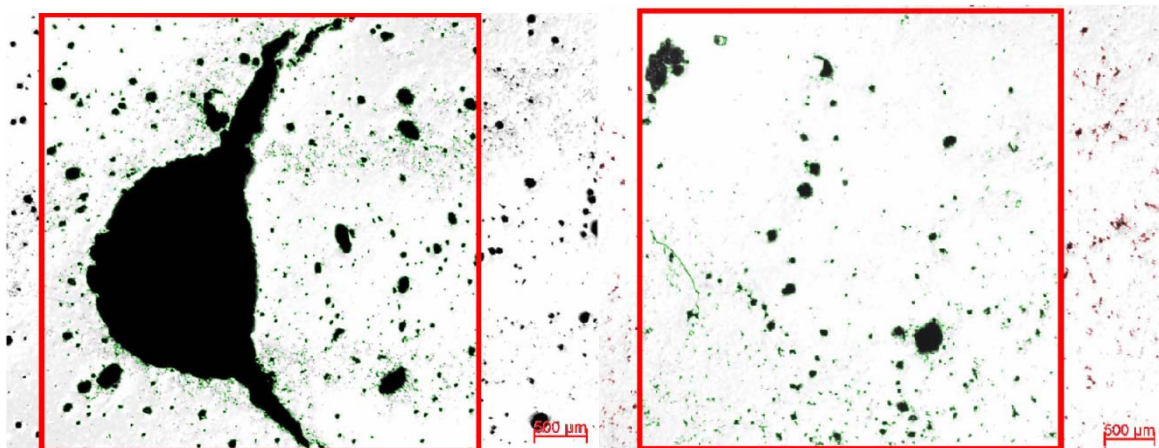
Można aktualnie wymienić wiele metod badania porowatości materiałów i odlewów, lecz ich zakres zastosowania jest często ograniczony zarówno pod względem materiałowym jak i wielkością badanych obiektów oraz zróżnicowany pod względem rozdzielczości. Metody badania porowatości muszą być dobierane pod kątem wielu czynników zarówno materiałowych, czynników konstrukcyjnych wyrobów oraz technologii a ponadto muszą one spełniać wymagania producentów wyrobów co do czasu i kosztów tego typu badań. Trzeba mieć świadomość celu takich badań i oczekiwań wobec planowanych do uzyskania wyników. Cała praca została zainspirowana zleceniem określonym przez Firmę produkcyjną, która potrzebowała szybkiej, skutecznej i możliwie nisko kosztowej metody weryfikacji poprawności wykonania skomplikowanych dość dużych powierzchniowo odlewów ciśnieniowych ze stopu magnezu AM50.

W poszukiwaniu optymalnej metody badania porowatości przeprowadzono badania porównawcze trzech wybranych metod o stosunkowo dużej dostępności w kraju i możliwości ewentualnego zaimplementowania jej w każdym zakładzie produkcyjnym, na etapie np. kontroli jakości. Wybrano metody:

- analizy obrazu zglądów metalograficznych pod kątem udziału objętościowego porów w strukturze,
- analizy udziału objętościowego porów z wykorzystaniem ultradźwiękowej mikroskopii akustycznej
- analizy udziału objętościowego porów z wykorzystaniem tomografii rentgenowskiej.

W pierwszej w/w metodzie w celu określenia parametrów opisujących porowatość analizowanych wyrobów wykonano analizy stereologiczne w 14 wybranych przekrojach przedmiotowego odlewu zróżnicowanych pod względem konstrukcyjnym i aspektów technologicznych. Analiza badanych zglądów przekrojów przy powiększeniach od 200 do 1000x pozwoliła ujawnić występujące w strukturze odlewu mikropory o bardzo zróżnicowanej morfologii i wielkości związanej z wieloma zjawiskami występującymi w czasie odlewania

ciśnieniowego. W wielu obszarach referencyjnych udział mikroporów jest bardzo duży w całkowitym ich udziale procentowym w strukturze. Obszary referencyjnie określono na bazie norm zakładowych producenta wyrobów. Wskaźnikiem określającym mikroporowatość może być liczba porów zidentyfikowanych w obszarze referencyjnym. W analizowanych strukturach występują m.in. pory gazowe o bardzo zróżnicowanej wielkości z przewagą mikroporów, pory związane z procesami krzepnięcia o zróżnicowanej szybkości oraz pory naprężeniowe. Maksymalne pory charakteryzowały się średnicami ekwiwalentnymi na poziomie ok. 2 mm oraz największą przekątną pora zidentyfikowanego w obszarze referencyjnym wynoszącej ok. 4 mm (rys. 3). Metoda ta cechuje się największą czasochłonnością ponieważ wymaga pobrania wielu drobnych elementów do badań aby statystycznie wynik analizy był wiarygodny i poprawnie zinterpretowany. Następnie należy przygotować zglądy, które zarówno ze względu na ilość jak i materiał w postaci stopu magnezu są dość trudnym zadaniem i także czasochłonnym o dużym udziale pracy ręcznej. Ostatni etap to badania na mikroskopie świetlnym polegające na czasochłonnym przeszukiwaniu obszarów, wykonywaniu pomiarów stereologicznych, zapisywaniu ich wyników i tworzeniu raportów cząstkowych oraz zbiorczych. W celu porównania zastosowanych metod badawczych porowatości przyjęto, że stopień czasochłonności tej metody wynosi 10 jednostek, awskaźnik kosztów badań określono na poziomie 15 punktów. Wartości zarówno czasochłonności jak i kosztów badań przyjęto w jednostkach bezwymiarowych dających szansę na względne porównanie wykorzystanych metod badań, na bazie własnych doświadczeń w czasie ich realizacji. Zaletą tej metody jest to, że aktualnie często jest zalecana przez różne normy wewnętrzne zakładów produkcyjnych ponadto duży udział operatora realizującego badania pozwala nie tylko na kontrole wartości porowatości, ale także innych ewentualnych wad wyrobów i materiału. Wadą są zapewne duże koszty i długi czas analizy oraz możliwość pominięcia wad istotnych z punktu widzenia wymagań odbiorowych czy wymagań producenta.



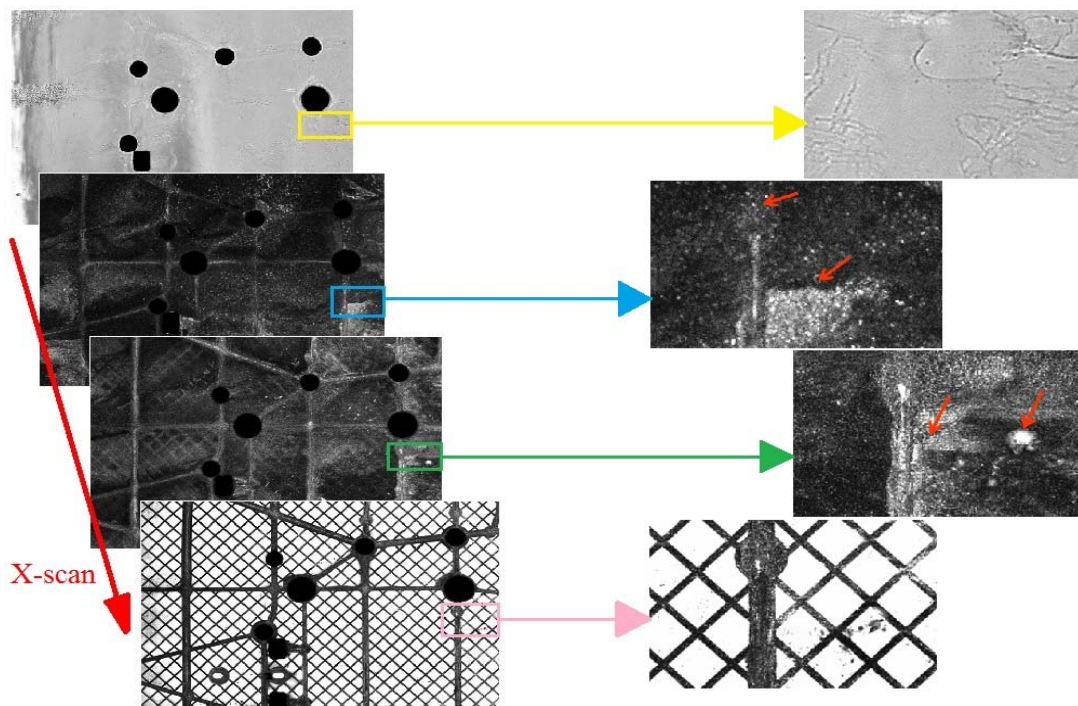
Rys. 3. Metoda I- morfologia porów z wyznaczonymi obszarami referencyjnymi (-) i konturem porów (-).

W II zastosowanej metodzie można wykonywać pomiary na próbkach stosunkowo dużych a często w przypadku mniejszych wyrobów na całych gotowych elementach (wyrobach). W przypadku niniejszej analizy porównawczej była to próbka o największych wymiarach, kilka do kilkunastu razy większych niż te w porównawczej metodzie I i III. Przedstawiona na rys. 4a próbka do oceny porowatości metodą ultradźwiękową została poddana badaniu w laboratorium wzorcowym producenta skaningowego mikroskopu akustycznego SAM 300 HD PVA TePla Analytical Systems GmbH. Konwencjonalne mikroskopy akustyczne mają ustaloną koncentrację pozycji podczas skanowania obrazu i wymagana jest próbka płaska. Praca z zakrzywionymi elementami

wymaga zastosowania urządzeń przystosowanych do badania wypukłych lub wklęsłych powierzchni np. jak w tym przypadku systemu HiSA, którego szerokopasmowy przetwornik porusza się po łuku, utrzymując stałą odległość od próbki oraz ostrość obrazowania na całej powierzchni próbki. Na rys. 4b zaprezentowano przykładowy wynik badania z metody C-scan. Białe obszary wskazane czerwonymi strzałkami odpowiadają dużym niedopasowaniem impedancji i wskazują na pory lub wtrącenia w metalu. Na obrazach X-Scan (rys. 5) objętość próbki została podzielona na wysokości na plastry o grubości 300 μm , wielkość pola skanowania wynosiła 300 mm x 200 mm, natomiast rozdzielczość - 25 μm .



Rys. 4. a) widok próbki do badań przy użyciu mikroskopii akustycznej, b) przykładowy wynik badań z wykorzystaniem metody II w trybie C-scan.

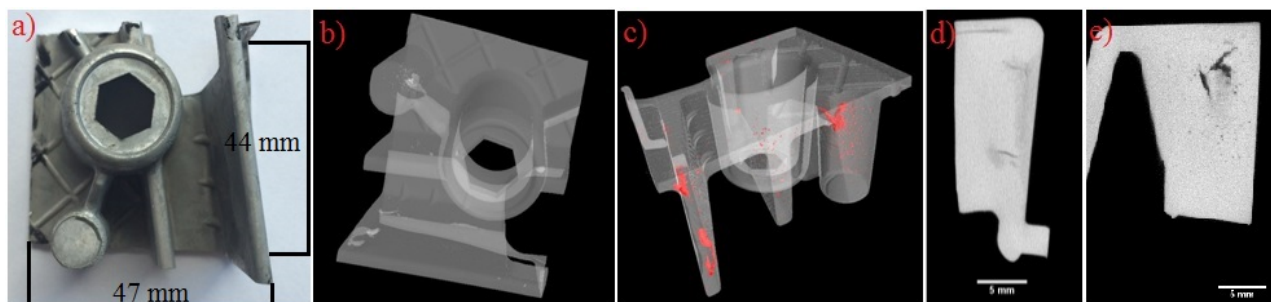


Rys. 5. Wyniki badań z wykorzystaniem metody II w trybie X-scan.

Oczywiście oba tryby pomiaru C i X skan umożliwiają szczegółowe przeglądanie badanych obszarów i analizę dokładną mikroobszarów interesujących z punktu widzenia zaleceń odbiorowych. Zaletą tej metody jest możliwość badania dużych próbek, szybkiego wykrywania obszarów niespełniających wymagań, analiza wszystkich obszarów bez pomijania ich dużej części jak ma to miejsce w metodzie I. Wyniki uzyskujemy w postaci pomiarów wielkości i ilości poszczególnych wad w materiale. Odpowiednio napisane makra zdecydowanie automatyzują procesy pomiarowe, skracając czas do uzyskania raportu z badań. Dodatkowo w trybie X-scan mamy możliwość analizy położenia porów w odniesieniu do powierzchni próbki czy wyrobu. Analiza całego obszaru dużej próbki jaką w tym przypadku badano przy średniej wartości rozdzielczości 25 μm zajmuje kilkanaście do kilkudziesięciu minut w zależności od trybu. Do wad metody należy zaliczyć na pewno dostępność drogiej aparatury, której wartość jest szacowana od 400-700 tys. zł, lecz w dzisiejszych czasach, kiedy możliwe jest przesyłanie próbek w ciągu 24 h na duże odległości zdecydowanie korzystniejsze jest zlecenie wyspecjalizowanym pracowniom tego typu badań. Wyniki można otrzymać najczęściej drogą elektroniczną w ciągu 24 h od wysłania próbki. W przypadku produkcji ciągłej wymagające stałej kontroli jakości jest to dość droga metoda, ale niezwykle szybka pod względem czasu niezbędnego do uzyskania wyniku i niski koszt nakładów na utrzymanie i wykonywanie badań. W przypadkach wykonywania powyżej 1000 testów rocznie inwestycja jest uzasadniona ekonomicznie. Wadą może być czasem w tej metodzie konieczność zanurzenia w czasie badań próbki w cieczy np. wodzie. Jednak ta metoda dla mniejszych wyrobów jest metodą nieniszczącą co w przypadku kontroli jakości ma duże znaczenie. Przyjęto, że stopień czasochłonności tej metody wynosi 2 jednostki, a wskaźnik kosztów badań przy założeniu zlecenia pracowniom wyposażonym w tego typu urządzenia określono na poziomie 4 punktów. Samo przygotowanie próbek do badań jest dość proste i mało czasochłonne. W odniesieniu do pozostałych metod ta metoda została

uznana za optymalną do celów kontroli jakości dla producenta wyrobów, które stanowiły tutaj próbki odniesienia.

Trzecia analizowana metoda wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie do analizy porowatości czy wad wewnętrznych próbek. Ze względu na dostęp do wersji aparatu z serii nanotomografów, wielkość możliwej do badania próbki nie jest zbyt duża (badano próbki o wymiarach 47 x 44 x 29 mm przedstawione na rys. 6a, lecz należy pamiętać, że tomografy mogą posiadać duże komory i możemy analizować stosunkowo duże próbki nawet porównywalne do analizowanych w metodzie II. Niestety tego typu urządzenia są najdroższe spośród 3 porównywanych metod, a zarazem wymagają odpowiedniej infrastruktury towarzyszącej, ze względu na wykorzystywane medium w postaci przenikliwego promieniowania X. W tym przypadku wykonano pomiar tomograficzny z rozdzielczością 25 μm . Na rys. 6d i 6e pokazano fragmenty przekrojów rentgenowskich badanych obszarów z widocznymi niejednorodnościami i porami. Wykonano przekroje w trzech kierunkach, gdzie zauważono wyraźne pory i niejednorodności w próbce. Dodatkowo ciemniejsze obszary 6b próbki, mogą świadczyć o innej gęstości materiału w tym miejscu, natomiast rys. 6c przedstawiono model próbki w formie półprzezroczystej umożliwiając obserwację rozkładu porów w całej objętości. Wyniki uzyskujemy w postaci pomiarów wielkości i ilości poszczególnych wad w materiale, z doskonałą orientacją przestrzenną wady. Podobnie jak w metodzie II odpowiednio napisane makra automatyzują procesy pomiarowe, skracając czas do uzyskania raportu z badań. Podobnie jak w metodzie II mamy w tym przypadku podobne zalety związane z brakiem konieczności wybierania fragmentów wyrobów (o ile dysponujemy odpowiedniej wielkości tomografem). Wadą tej metody jest stosowanie promieniowania jonizującego co podwyższa koszt badań i samej aparatury. Przyjęto, że stopień czasochłonności tej metody wynosi 3 jednostki, a wskaźnik kosztów badań przy założeniu zlecenia pracowniom wyposażonym w tego typu urządzenia określono na poziomie 6 punktów.



Rys. 6. a) widok próbki do badań metodą III z wykorzystaniem nanotomografu Nanotom S firmy General Electric, b) model próbki w formie półprzezroczystej, c) przestrzenny rozkład porów w próbce, d) i e) widok dwóch wybranych przekrojów próbki ujawniających pory.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań porównawczych w/w metod badawczych optymalną metodą badawczą dla dostarczonego wyrobu ze stopu magnezu wybrano technikę opartą na mikroskopii akustycznej. Metoda ta pozwala na badania dużych elementów w osi X i Y oraz stosunkowo dużych w osi Z, umożliwiając badanie całych elementów bez konieczności dzielenia gotowego wyrobu na kawałki poddawane osobnej analizie statystycznej. Rozdzielczość obrazowania wad jest wystarczająca dla wad typu pory i mikropory. W czasie

analizy danej metod badawczej stosowano optymalizację parametrów badania takich jak rozdzielczość, aby możliwe było stosunkowo bezpośrednie porównanie zastosowanych metod badawczych. Zarówno w metodzie II i III, rozdzielczość to kluczowy parametr, który wpływa na czasochłonność badań. W obu metodach rozdzielczości mogą być zastosowane dużo mniejsze, lecz ze względu na charakter problemu przyjęto, że poziom 25 μm jest optymalny z punktu widzenia oczekiwań producenta wyrobów, a zarazem poprawny z punktu widzenia metodyki badań.

Literatura

1. Ocoś, K.E., Kawalec, A., Kształtowanie metali lekkich, PWN, Warszawa, 2012.
2. Przybyłowicz, K., Przybyłowicz, J., Repetytorium z materiałoznawstwa. Część VI, Metale i stopy nieżelazne, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 1997.
3. Skrzypek, S.J., Przybyłowicz, K., Inżynieria metali i ich stopów. Wydawnictwo AGH, Kraków, 2012.
4. Kozakowski, S., Badanie odlewów - technologie odlewnicze, typowe dla nich wady i metody ich ujawniania. Biuro Gamma, Warszawa, 2001.
5. Kielbus, A., Cibis, R., 2006. Wpływ parametrów odlewania ciśnieniowego na strukturę i własności stopu magnezu AM50, *Archiwum Odlewnictwa*, 2006, 18, s. 185-190.
6. Uniwersał, A., Wróbel, M., Wroński, S., Bonarski, J., Tchórz, A., Kania, B., Porównanie wybranych metod badania porowatości odlewów ciśnieniowych ze stopu magnezu AZ91, *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, 2013, 4, s. 235-241.
7. PN-EN 1753:2001, Magnez i stopy magnezu - Gąski i odlewy ze stopów magnezu.
8. www.zeiss.com (dostęp 12.02.2016).
9. www.pva-analyticalsystems.com (dostęp 12.02.2016).
10. www.gemeasurement.com (dostęp 12.02.2016).