



Zastosowanie metod komputerowych przy wyznaczaniu porowatości spiekanych stali konstrukcyjnych

A. Łuckoś^a, M. Musztyfaga^b

^a Absolwent Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: arkadiuszluckos@wp.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: malgorzata.musztyfaga@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono ocenę porowatości stali konstrukcyjnej przy użyciu metod komputerowych z wykorzystaniem programów ImageProPlus i SigmaScan. Dokonano również porównania i oceny uzyskanych wyników. Do badań wykorzystano próbki wytworzone na bazie proszków żelaza szwedzkiej firmy Höganäs o nazwie Astaloy CrM i CrL. Próbkę prasowano przy dwóch ciśnieniach prasowania 500 i 600 MPa, wykonując prostopadłościennie wypraski. Wypraski spiekano w próżni w temperaturze 1120°C przez 30 minut i chłodzono z trzema różnymi szybkościami chłodzenia 0,3, 1,6 i 6,5°C/s. Na podstawie wykonanych zdjęć zglądów metalograficznych wykonano obliczenia podstawowych parametrów porów m. in. ich powierzchni, średnicy, obwodu i współczynnika kształtu.

Abstract: The paper presented the porosity evaluation of constructional steel computer usage methods using programs ImagePro Plus and SigmaScan. It was performed a comparison and evaluation of obtained results. To investigations were used samples manufactured on the basis of iron powders of the Swedish company Höganäs called AstaloyCrM and CrL. Samples were pressed at two pressures 500 and 600 MPa forming rectangular green compacts. Green compacts were sintered in a vacuum at 1120°C for 30 minutes and cooled with three different cooling rates 0.3, 1.6 and 6.5°C/s. The calculations of basis pores parameters such as their area, diameter, perimeter and shape factor were performed on the basis of images of metallographic specimens.

Słowa kluczowe: metalurgia proszków, porowatość, spiekana stal konstrukcyjna

1. WSTĘP

Elementy pozyskiwane z wykorzystaniem metalurgii proszków znajdują coraz szersze zastosowanie m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, maszynowym, lotniczym, budowlanym, elektrotechnicznym i zbrojeniowym. Materiałom inżynierskim stawia się coraz większe

wymagania wytrzymałościowe związane z warunkami pracy przy minimalizacji kosztów ich produkcji. Elementy takie pracują w wysokiej temperaturze w warunkach uniemożliwiających zastosowanie konwencjonalnych metod smarowania, a także narażone są na różnego rodzaju obciążenia. Do najważniejszych zalet stosowania metalurgii proszków zalicza się: możliwość uzyskania materiałów spiekanych niemożliwych do uzyskania innymi metodami, niewielką ilość odpadów nieprzekraczającą 5% materiałów, a także możliwość uzyskania gotowych elementów nie wymagających dalszej obróbki [1,2].

Materiał do badań porowatości wytworzono na bazie dwóch różnych proszków żelaza: AstaloyCrL i AstaloyCrM szwedzkiej firmy Höganäs w Politechnice w Turynie we Włoszech. Wykonane kształtki spiekano w piecu próżniowym w temperaturze 1120°C i chłodzono z trzema szybkościami chłodzenia: 0,3, 1,6 i 6,5°C/s. W pracy wykonano zdjęcia metalograficzne w celu zbadania porowatości materiałów spiekanych. Do analizy zdjęć wykorzystano programy ImageProPlus i SigmaScan, które wybrano na podstawie ich możliwości badania określonych parametrów charakteryzujących pory w badanym materiale.

Celem pracy jest ocena porowatości w spiekanych stalach konstrukcyjnych i porównanie zastosowanych do jej obliczeń programów komputerowych.

2. METALURGIA PROSZKÓW

Metalurgia proszków jest dziedziną techniki zajmującą się wytwarzaniem wyrobów z proszków metali, mieszanek metali z niemetalami lub z proszków stopowych. Tworzenie zwartych kształtek z proszków uzyskuje się dzięki spiekaniu sprasowanych ziarn proszków. Proces ten następuje przy pominięciu fazy ciekłej głównego składnika. Metalurgia proszków odgrywa coraz większą rolę w technologii wytwarzania metali, tworząc tym samym konkurencję obróbce plastycznej i metodom odlewniczym. Elementy z materiałów trudnotopliwych mogą być wykonane tylko z wykorzystaniem metalurgii proszków [1-3].

3. POROWATOŚĆ

Elementy porowate wykazują gorsze własności mechaniczne niż wytworzone metodami tradycyjnymi, dlatego dla elementów obciążonych dąży się do zmniejszenia porowatości. W niektórych elementach występowanie porowatości jest korzystne i wymagane np. w łożyskach samosmarujących i filtrach w celu dalszego ich umacniania i nasycania [4,5,20].

Pory dzielą się na pory otwarte i pory zamknięte. Porami otwartymi nazywa się pory, które mają połączenia zarówno pomiędzy sobą, jak również pomiędzy powierzchnią zewnętrzną materiału. Pory takie tworzą swego rodzaju szkielet o swobodnym przepływie gazu i układ taki nazywany jest porowatością otwartą [4,5].

Porowatość otwarta (P_o) określona wzorem (1), jest stosunkiem objętości porów otwartych do całej objętości elementu i wyrażana jest w procentach [6,7]:

$$P_o = \frac{V_{po}}{V_{pr}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdzie: V_{po} – objętość porów otwartych; V_{pr} – objętość próbki wraz z porami.

Pory zamknięte nie tworzą szkieletu i połączeń pomiędzy sobą, ale zespół pojedynczych nie połączonych ze sobą pęcherzyków gazu, a strukturę takich porów nazywa się porowatością zamkniętą.

Porowatość zamknięta (P_z) określona wzorem (2), jest stosunkiem objętości porów zamkniętych do całej objętości elementu i wyrażona jest w procentach [6,7]:

$$P_z = \frac{V_{poz}}{V_{pr}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

gdzie: V_{poz} – objętość porów zamkniętych, V_{pr} – objętość próbki wraz z porami.

Porowatość całkowita (P_c) określona wyrażeniem (3), jest to suma porów otwartych i zamkniętych wyrażona w procentach [4,6,7]:

$$P_c = P_o + P_z \% \quad (3)$$

gdzie: P_o – porowatość otwarta, P_z – porowatość zamknięta.

W materiale spiekany por może występować w dwóch przypadkach (rys. 1):

- równowagi – kształt i objętość poru nie zmienia się, a por wypełniony jest gazem o takim samym ciśnieniu, co ciśnienie powierzchniowe (w skutek zmiany powierzchni styku pomiędzy fazami (proszek – por) powstają dodatkowe siły na zakrzywionych powierzchniach, a ciśnieniem powierzchniowym nazywana jest różnica ciśnień wywołana powstałymi siłami [4]),
- braku równowagi – ciśnienie gazu wewnątrz poru i ciśnienie powierzchniowe jest inne, a różnica tych ciśnień określa pole naprężeń w materiale [4].



Rysunek 1. Rodzaje porów występujących w materiałach porowatych (1 – por zamknięty, 2 – por otwarty) [10]

Figure 1. Types of pores present in the porous materials (1 – closed pore 2 – open pore) [10]

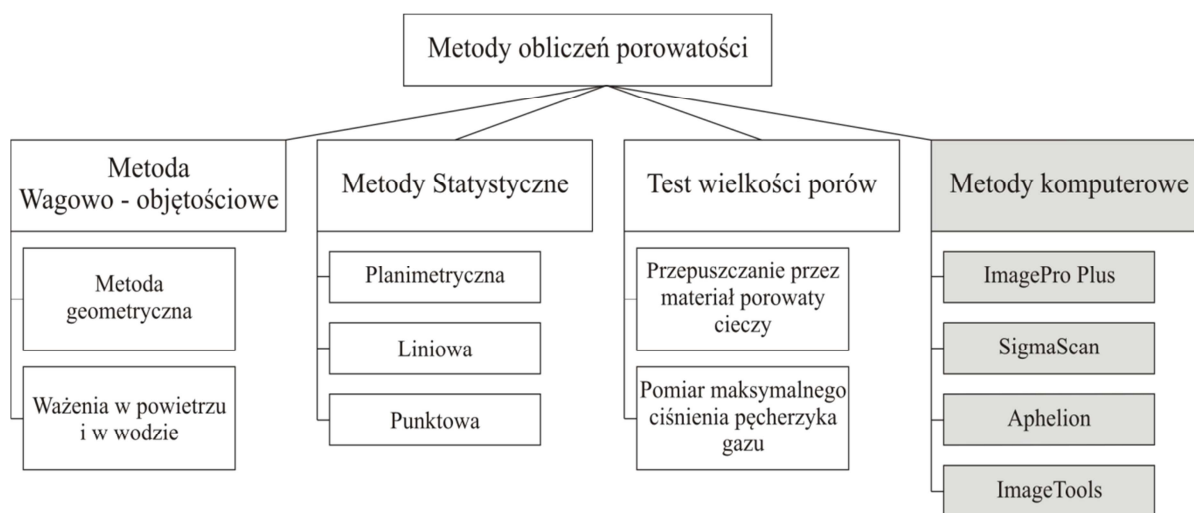
4. METODY OKREŚLANIA POROWATOŚCI

Podział metod obliczania porowatości przedstawiono na rysunku 2. W artykule skupiono się na komputerowych metodach badania porowatości.

4.1. Komputerowe metody badania porowatości

Powszechnie stosowanymi technikami badań materiałów spiekanych są metody wspomagane programami komputerowymi pozwalające na analizę zdjęć z mikroskopów świetlnych i skaningowych. Następnie mikrografie uzyskane za pomocą mikroskopów poddaje się obróbce cyfrowej z wykorzystaniem zaawansowanych programów graficznych m.in.: Image Pro Plus [11], SigmaScan [12], Image Tool [13], Aphelion [14], Olympus [15]. Mimo zastosowania komputerowej obróbki zdjęć pory znajdujące się w przestrzeni materiału są obiektami

trójwymiarowymi. Na podstawie zdjęć mikroskopowych możliwe jest zbadanie rozmiarów porów, ich morfologii, rozkładu średnicy porów i ich rozmieszczenia, ale są tylko zdjęciami dwuwymiarowymi. Większe skomplikowanie kształtów i rozmieszczenie porów może prowadzić do pominięcia znaczących informacji. Nieregularność porów powoduje niejednoznaczne określenie średnicy porów. Terminem „średnice” opisuje się tylko pory o kształcie sferycznym. Przy bardziej skomplikowanych kształtach stosuje się pojęcie „średnicy zastępczej”, która określa średnicę okrągłego fikcyjnego obiektu o tej samej powierzchni, co analizowany por [16].



Rysunek 2. Schemat metod obliczania porowatości

Figure 2. Schematic of methods for calculating the porosity

Zdjęcia z mikroskopów zapisywane są w postaci cyfrowej w jednej z dwóch podstawowych metod zapisu grafiki: wektorowej lub rastrowej. Grafika wektorowa jest zapisana funkcjami matematycznymi i składa się z punktów (węzłów) połączonych liniami. Zdefiniowane za pomocą współrzędnych węzłów i promieni krzywizny elementy połączone ze sobą tworzą oddzielne obiekty. Każdy z obiektów jest niezależną częścią obrazu i może być modyfikowany z wykorzystaniem odpowiednich programów. Grafika rastrowa zapisywana jest w postaci tablicy liczb odpowiadających kolorowi kolejnych punktów (pikseli) tworzących obraz. Do analizy komputerowej obrazów stosuje się grafikę rastrową, gdyż pozwala na identyfikację dużo większej ilości szczegółów [16].

Zalety stosowania cyfrowych metod obróbki obrazów [16]:

- mniejsze prawdopodobieństwo błędu,
- wzrost obiektywności uzyskanych wyników,
- niemal 100% powtarzalność wyników stosowanej metody,
- niższy koszt w przypadku powtarzających się rutynowych badań.

Wady obróbki cyfrowej [16]:

- wysokie koszty wykonania jednorazowych badań,
- słabe możliwości oceny jakościowej badanej mikrostruktury,
- konieczność zastosowania zdjęć o wysokiej jakości.

Ważnym elementem przy korzystaniu z cyfrowej obróbki obrazów jest wykonanie mikrofotografii i przygotowanie zgładów do badania. Przy wykorzystaniu mikroskopu światelnego należy obraz tworzyć z taką samą rozdzielczością jak rozdzielczość obiektywu. W przypadku

zbyt małej rozdzielczości część elementów rozpoznawanych przez mikroskop zostanie utraczonych na zdjęciu, a przy zbyt dużej rozdzielczości zostaną uzyskane piksele z „pustym powiększeniem”, które nie zawierają żadnych informacji. Podczas przygotowania zgładów z materiałów plastycznych często następuje zniekształcenie brzegów porów, co w efekcie powoduje zaniżenie ich wielkości i ilości na obrazie. Przy materiałach twardych i kruchych następuje wykruszanie się krawędzi w trakcie polerowania, co w efekcie również wpływa na uzyskane wyniki badań [16].

5. MATERIAŁ DO BADAŃ

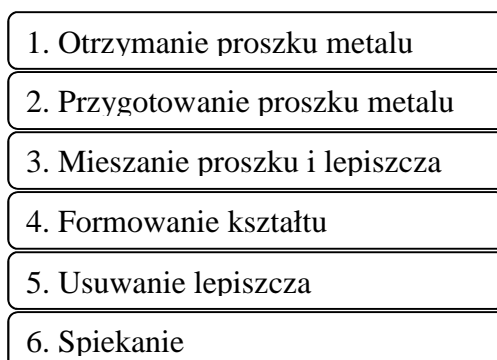
Zestawienie wykonanych próbek i warunków wytwarzania przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie wykonanych próbek i warunków ich wytwarzania

Table 1. Matching of performed samples and conditions of their manufacturing

Lp.	Oznaczenie próbek	Ciśnienie prasowania, MPa	Rodzaj proszku	Szybkość chłodzenia, C/s	Gęstość pozorna, g/cm ³
1	X	1	CrL	0.3	6,40
2		2			6,60
3		3	CrM		6,80
4		4			6,70
5	Y	1	CrL	1.6	6,50
6		2			6,70
7		3	CrM		6,70
8		4			6,60
9	Z	1	CrL	6.5	6,40
10		2			6,60
11		3	CrM		6,80
12		4			6,60

Rysunek 3 przedstawia proces technologiczny wytwarzania badanego materiału spiekane [10].



Rysunek 3. Proces technologiczny wytwarzania badanego materiału

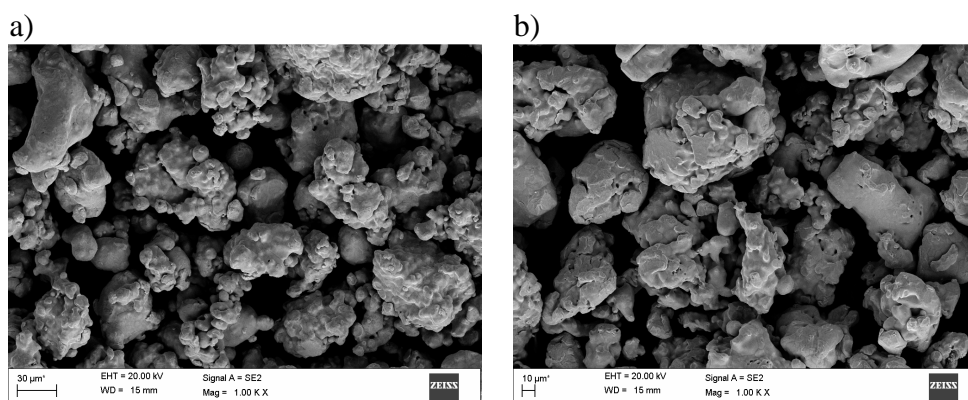
Figure 3. Technological process for production of test material

Proszki wykorzystane do wykonania próbek wytworzono metodą mechaniczną poprzez rozpylanie, a skład produktów przedstawiono w tablicy 2 [2,3].

Tablica 2. Skład chemiczny wytworzonego proszku udostępniony przez producenta [17]
 Table 2. Chemical composition of the produced powder provided by the manufacturer [17]

Nazwa proszku bazowego	Stężenie masowe pierwiastków, %			
	Mo	Cr	C	O ₂ -tot
AstaloyCrL	0,20	1,50	< 0,01	0,16
AstaloyCrM	0,50	3,00	< 0,01	0,21

Rysunek 4 przedstawia zdjęcia proszku bazowego wykonane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego zlokalizowanego w laboratorium Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach [21].



Rysunek 4. Proszki: a) Astaloy CrL, b) Astaloy CrM
 Figure 4. Powders: a) Astaloy CrL, b) Astaloy CrM

W trakcie wykonania mieszanek proszkowych oprócz proszku bazowego odmierzeniu podlegał również grafit w ilości 0,6%, a także środek poślizgowy w ilości 0,75%, który dodano do każdej z mieszanek [18,19].

Dla badanego materiału prasowanie odbyło się na prasie hydraulicznej o sile nacisku 200 kN. W celu zbadania wpływu prasowania na porowatość wytworzono próbki pod ciśnieniem 500 oraz 600 MPa [18,19].

Przed wykonaniem spiekania wypraski poddano wygrzewaniu przez godzinę w temperaturze 550°C w piecu laboratoryjnym. Zabieg taki ma na celu wyeliminowanie największych obszarów lepiszcza. Takie działanie zapobiega deformacjom, pęknięciom, a także powstawaniu pęcherzy gazowych [18,19].

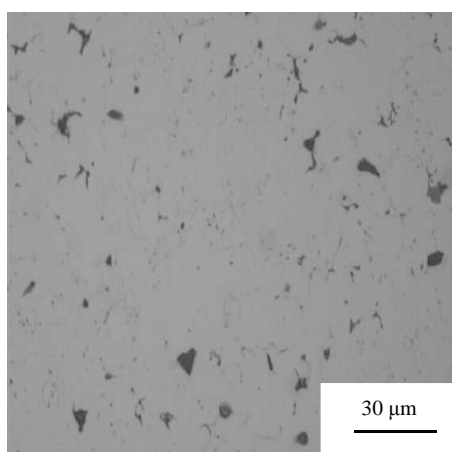
Wszystkie wypraski spiekano przez 30 minut w temperaturze 1120°C. Operacja spiekania odbyła się w piecu próżniowym w osłonie argonu. Następnie próbki chłodzono z trzema szybkościami: 0,3, 1,6 i 6,5°C/s. Oprócz próbek chłodzonych w sposób bardzo wolny pozostałe próbki wyżarzono w temperaturze 200°C przez godzinę w tym samym piecu, w którym wykonano spiekanie.

Przygotowanie próbek do badań metalograficznych składało się z następujących operacji [8,9,20]:

- odcięcia fragmentu materiału z próbki,
- inkludowania próbek,
- szlifowania,
- polerowania.

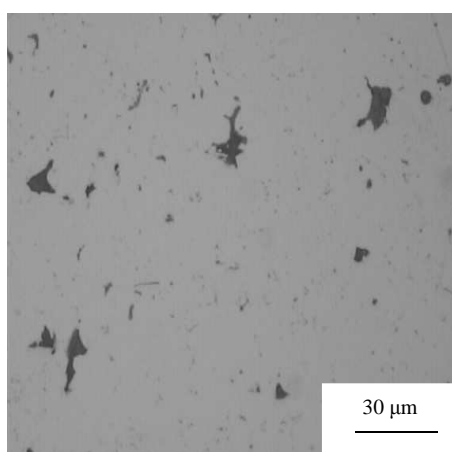
Wszystkie urządzenia wykorzystane do przygotowania próbek i wykonania zdjęć znajdują się w laboratorium Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Zdjęcia próbek wykonano za pomocą programu Leica QWin w mikroskopie optycznym Axiovert 405 M. Wszystkie zdjęcia metalograficzne wykonano przy powiększeniu 25 x. Dla każdej próbki wykonano oddzielną serię zdjęć. Następnie zdjęcia zapisano w formacie JPG i poddano analizie z wykorzystaniem programów: Image-Pro Plus firmy Media Cyberneticus i Sigma Scan firmy Systat Software. Przykładowe zdjęcia przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rysunek 5. Analiza obrazu porowatości struktury stali Y1 spiekanej w 1120°C przez 30 min. i chłodzonej z szybkością 1,6°C/s

Figure 5. Analysis of the image porosity structure of the steel Y1 sintered at 1120°C for 30 min. and cooled at a rate of 1.6°C/s



Rysunek 6. Analiza obrazu porowatości struktury stali Y2 spiekanej w 1120°C przez 30 min. i chłodzonej z szybkością 1,6°C/s

Figure 6. Analysis of the image porosity structure of the steel Y2 sintered at 1120°C for 30 min. and cooled at a rate of 1.6°C/s

Uzyskane zdjęcia poddano komputerowej analizie pod kątem badania porowatości. Do najczęściej stosowanych programów do badań statystycznych w przemyśle należą ImagePro Plus, SigmaScan, ImageTool. Programy te służą do komputerowej analizy badanych zdjęć z wykorzystaniem wbudowanych narzędzi służących analizie badanych obrazów [10,16].

5.1. Program „ImagePro Plus”

Jednym z dostępnych programów do cyfrowej obróbki zdjęć jest program „ImagePro Plus” pracujący w środowisku Windows. Program ten obsługuje wiele różnych formatów plików, w tym cztery podstawowe: jpg, tif, gif, bmp. Dzięki narzędziom istnieje możliwość przeprowadzenia standardowych pomiarów: szerokości, długości, odległości, średniej średnicy i rozmieszczenia porów w analizowanej próbce [10].

Algorytm analizy obrazu za pomocą programu ImagePro Plus [10]:

- 1) wczytanie obrazu,
- 2) wyskalowanie obrazu na podstawie markera,
- 3) wybór obszaru do mierzenia na zdjęciu metalograficznym,
- 4) zastosowanie maski (maska – zaznaczenie obszaru spełniającego określone wymagania [10]. Zastosowana maska zaznacza obszar w zakresie kolorów 0-126) w celu przekształcenia uzyskanego obrazu w obraz binarny (obraz binarny – obraz przyjmuje dwie możliwe wartości – poszczególne piksele są przekształcone w kolor czarny i biały [22]).
- 5) dokonanie obliczeń na podstawie uzyskanych informacji i ich zapis w arkuszu kalkulacyjnym.

5.2. Program „SigmaScan”

Program SigmaScan jest jednym z kilku programów oferowanych przez firmę Systat Software. Pozwala on na pomiary: odległości, kątów, pola powierzchni, klasyfikacji badanych elementów, a także posiada szereg narzędzi do poprawy jakości badanego obrazu. Mechanizm warstw umożliwia zarówno pomiar obszarów o określonej barwie, jak również obszarów o barwach powyżej założonego progu. W programie zawartych jest kilka narzędzi umożliwiających identyfikację krawędzi, modyfikacji rozkładu kolorów, nasycenia, jasności, a także konwersji do skali szarości. W programie oprócz analizatora obrazu wbudowany jest również podręczny arkusz kalkulacyjny, w którym zapisywane są uzyskiwane informacje oraz generator wykresów. Wbudowany arkusz kalkulacyjny pozwala na przeprowadzenie automatycznych badań statystycznych informacji zapisanych w kolumnach takich jak: średnia, odchylenie standardowe, wartości maksymalne i minimalne oraz funkcje arytmetyczne. Program obsługuje szereg podstawowych rozszerzeń takich jak: jpg, tif, gif, bmp [12].

Algorytm postępowania przy użyciu SigmaScan [12]:

- 1) wczytanie obrazu,
- 2) kalibracja badanego obrazu,
- 3) ustawienie zakresu analizowanego obrazu,
- 4) ustawienie wybranych funkcji do obliczeń,
- 5) zapisanie uzyskanych informacji.

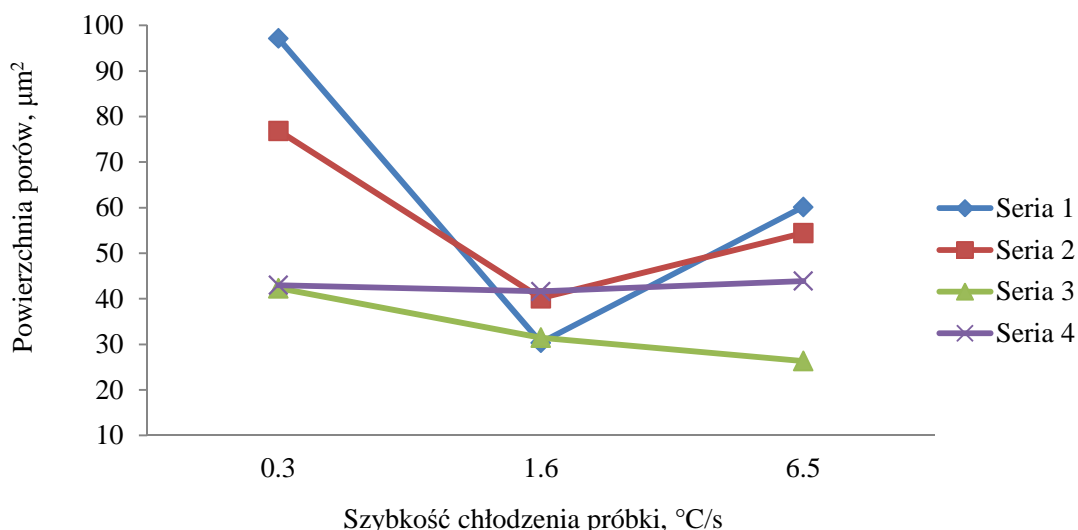
6. PRZYKŁADOWE WYNIKI

Poniżej przedstawiono przykładowe zestawienie informacji uzyskanych z programów ImagePro Plus i SigmaScan dotyczące: powierzchni porów, które zidentyfikowano w gotowym już materiale badawczym tzw. spiekach (tab. 3, rys. 7 i 8).

Tablica 3. Powierzchnia badanych porów

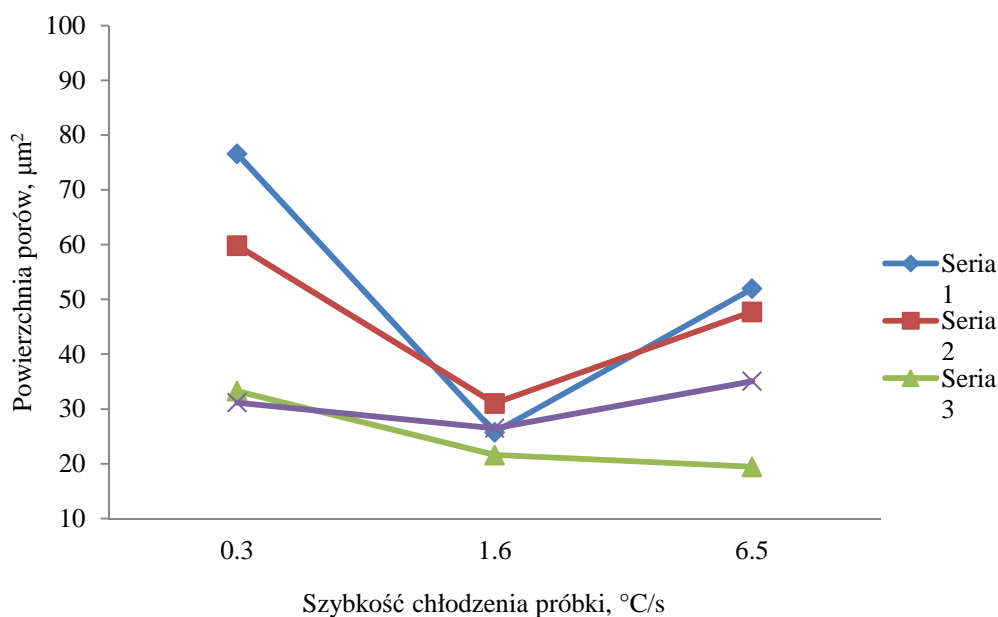
Table 3. The area of investigated pores

			ImagePro Plus		SigmaScan	
			Oznaczenie próbki	Wartość	Oznaczenie próbki	Wartość
Seria X	Średnia powierzchnia porów	max., μm^2	X1	97,16	X1	76,55
		min., μm^2	X3	42,32	X4	31,16
	Wartość średnia, μm^2		64,85		50,2	
Seria Y	Średnia powierzchnia porów	max., μm^2	Y4	41,62	Y2	31,02
		min., μm^2	Y1	30,37	Y3	21,61
	Wartość średnia, μm^2		35,9		26,21	
Seria Z	Średnia powierzchnia porów	max., μm^2	Z1	60,18	Z1	51,97
		min., μm^2	Z3	26,36	Z3	19,45
	Wartość średnia, μm^2		46,22		38,55	



Rysunek 7. Wykres zależności powierzchni porów od szybkości chłodzenia na podstawie programu ImagePro Plus (Seria 1 – X1,Y1,Z1; Seria 2 – X2,Y2,Z2; Seria 3 – X3,Y3,Z3; Seria 4 – X4,Y4,Z4)

Figure 7. Graph of the dependence of the pore surface of cooling rate based on the ImagePro Plus software (Series 1 – X1, Y1, Z1, Series 2 – X2, Y2, Z2, Series 3 – X3, Y3, Z3; Series 4 – X4, Y4, Z4)



Rysunek 8. Wykres zależności powierzchni porów od szybkości chłodzenia na podstawie programu SigmaScan (Seria 1 – X1,Y1,Z1; Seria 2 – X2,Y2,Z2; Seria 3 – X3,Y3,Z3; Seria 4 – X4,Y4,Z4)

Figure 8. Graph of the dependence of the pore surface of cooling rate based on the SigmaScan software (Series 1 – X1, Y1, Z1, Series 2 – X2, Y2, Z2, Series 3 – X3, Y3, Z3; Series 4 – X4, Y4, Z4)

Pory o największej powierzchni zarejestrowano dla próbek X chłodzonych z szybkością chłodzenia $0,3^{\circ}\text{C/s}$, a pory o najmniejszej powierzchni zarejestrowano w próbkach Y chłodzonych z szybkością chłodzenia $1,6^{\circ}\text{C/s}$.

7. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Dla próbek o wyższym stężeniu chromu i molibdenu wykonanych na bazie proszku Astaloy CrM zaobserwowano drobniejsze pory niż w próbkach na bazie proszku Astaloy CrL. W próbkach tych zaobserwowano pory o mniejszej średniej powierzchni, mniejszej średnicy, a także mniejszym obwodzie.
2. Najdrobniejsze pory występują w próbce wykonanej na bazie proszku Astaloy CrM chłodzonej z szybkością $6,5^{\circ}\text{C/s}$ i prasowanej przy ciśnieniu 600 MPa. Dla tej próbki występują pory o najmniejszej średniej powierzchni porów, najmniejszej średnicy i najmniejszym obwodzie.
3. W próbkach chłodzonych z szybkością $0,3^{\circ}\text{C/s}$ wykonanych na bazie proszku Astaloy CrL pory charakteryzują się największą powierzchnią, średnicą i obwodem.
4. Najbardziej zbliżone parametry (powierzchni, średnicy i obwodu) z zastosowanych badanych serii uzyskano dla próbek chłodzonych z szybkością $1,6^{\circ}\text{C/s}$.

5. Program ImagePro Plus ma wbudowanych więcej funkcji pozwalających na uzyskanie dodatkowych informacji związanych z obliczeniem parametrów poszczególnych obiektów. Na przykładzie średnicy w tym programie można uzyskać informacje o maksymalnej, minimalnej i średniej średnicy obliczonej dla każdego pojedynczego poru. Natomiast w programie SigmaScan występuje tylko uśredniona wartość średnicy dla każdego poru.
6. W programie ImagePro Plus jest kilka możliwości skalowania obrazu. Jedną z nich jest wyskalowanie zdjęcia na podstawie markera uzyskanego w trakcie wykonywania zdjęcia w mikroskopie. W programie SigmaScan nie ma takiej możliwości, więc do kalibracji obrazu trzeba wykorzystać obliczony współczynnik przeliczenia długości odcinka odmierzzonego na zdjęciu do rzeczywistej długości lub na podstawie rzeczywistych wymiarów i pola powierzchni zdjęcia.

LITERATURA

1. M. Sułowski, Ł. Igras, Wpływ temperatury spiekania i składu chemicznego atmosfery na strukturę i własności mechaniczne spiekanych stali konstrukcyjnych na bazie proszku Astaloy CrL i CrM, Rudy i Metale Nieżelazne 51/11 (2006) 686-694.
2. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Gliwice, 2002.
3. S. Stolarz, Metalurgia Proszków, Rudy i Metale Nieżelazne 50/9 (2005) 500-501.
4. M. Sułowski, W. Sowa, Wpływ parametrów wytwarzania na charakter porowatości spiekanych konstrukcyjnych stali manganowych, Rudy i Metale Nieżelazne 51/3 (2006) 155-162.
5. M. Sułowski, G. Zawisza, Wpływ parametrów wytwarzania na własności i strukturę spiekanych konstrukcyjnych stali manganowych z dodatkiem chromu i molibdenu. Część I: własności mechaniczne, Rudy i Metale Nieżelazne 52/4 (2007) 206-214.
6. Norma PN-85/H-01014: Metalurgia proszków. Terminologia.
7. Norma PN-81/H-04934: Metalurgia proszków. Oznaczenie gęstości, porowatości otwartej, zawartości oleju i stopnia nasycenia.
8. T. Ostrowski, Metalurgia proszków, WU, Lublin, 1978.
9. A. Ciaś, H. Frydrych, T. Pieczonka, Zarys metalurgii proszków, WSiP, Warszawa, 1992.
10. L.A. Dobrzański, M. Musztyfaga, M. Actis Grande, M. Rosso, Computer aided determination of porosity in sintered steel, Archives of Materials Science and Engineering 38/2 (2009) 103-111.
11. strona internetowa: http://www.mediacy.com/index.aspx?page=Image_Pro_Software
12. strona internetowa: <http://www.sigmaplot.com/products/sigmascan.php>
13. strona internetowa: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>
14. strona internetowa: <http://www.aertia.com/en/productos.asp?pid=284>
15. strona internetowa: <http://www.olympus-ims.com/pl/microscope/stream>
16. M. Sułowski, Zastosowanie metod komputerowych przy wyznaczaniu porowatości spiekanych stali, Rudy i Metale Nieżelazne 53/10 (2008) 627-645.
17. strona internetowa: <http://www.hoganas.com/>
18. L.A. Dobrzański, M. Musztyfaga, Influence of cooling rates on properties of pre-alloyed PM materials, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 37/1 (2009) 28-35.

19. L.A. Dobrzański, M. Musztyfaga, Effect of cooling rates on sinter-hardened properties, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 37/2 (2009) 630-638.
20. J. Pacyna, *Metaloznawstwo. Wybrane zagadnienia*, UWND AGH, Kraków, 2005.
21. Norma PN-84/H-04956: Metalurgia proszków. Oznaczenie kształtu cząstek.
22. strona internetowa: <http://www.multiscan.com.pl/Produkty.php?msc>