

Jerzy POGORZALEK, Lech BULKOWSKI, Urszula GALISZ, Wojciech BURIAN,
Jerzy STĘPIEŃ, Artur ŻAK

Instytut Metalurgii Żelaza

Remigiusz PRZEŚLAK, Mariusz STENCEL

MESKO S.A., Warszawa

Janusz NOGA

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

OPRACOWANIE KOMPLEKSOWEJ TECHNOLOGII WYTWARZANIA MAGNETO-ZWIERCIADEŁ STOSOWANYCH W GIROSKOPOWYCH SYSTEMACH NAPROWADZANIA RAKIET

Przedstawiono wyniki badań nad technologią wytwarzania magneto-zwierciadła, które jest podstawowym elementem inteligentnego obiektywu koordynatora lotu rakiety przeciwlotniczej. Realizacja badań ukierunkowana była na poprawę jakości pierścieni magneto-zwierciadeł, poprzez zastosowanie nowych technologii do ich produkcji, aby maksymalnie ograniczyć ich odrzut na poszczególnych etapach wykonania. Wyznaczone bardzo wysokie kryteria jakości metalurgicznej magneto-zwierciadła wymusiły wielokierunkowe działania badawcze w obszarach: modyfikacji składu stopu AlNiCo, technologii wytapiania i odlewania w próżni, obróbki cieplnej i termomagnetycznej odlewów oraz specjalistycznej obróbki mechanicznej i optycznej. Na rynek krajowy został wprowadzony nowy produkt o istotnie zmodyfikowanych parametrach geometrii i jakości, do chwili obecnej nieprodukowany. Uzyskany efekt ekonomiczny wynika z ograniczenia odrzutów wysoce kosztownych magneto-zwierciadeł na poszczególnych etapach ich produkcji, obniżeniu kosztów materiału i robocizny.

Słowa kluczowe: stop AlNiCo, magneto-zwierciadła, technologia wytwarzania, właściwości fizyczne, magnetyczne i optyczne, kryteria oceny

DEVELOPMENT A COMPREHENSIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF MAGNETO-MIRRORS APPLIED IN MISSILES GYROSCOPIC GUIDANCE SYSTEMS

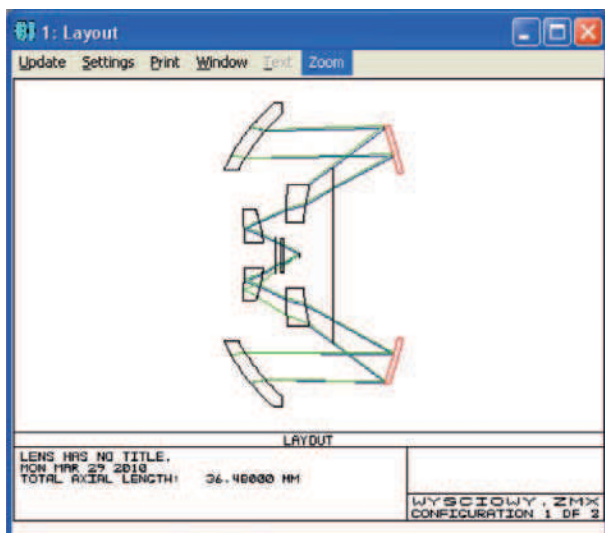
The results of research on the technology of production of magneto-mirror, which is an essential component of the smart lens anti-rocket flight coordinator were presented. Carrying out of the research was aimed at improving the quality of the rings of magneto-mirrors, through the use of new technology for their production in order to minimize their discards at various stages of manufacturing. Designated very high metallurgical quality criteria of magneto-mirror forced multidirectional research activities in the areas: modification of the chemical composition of the AlNiCo alloy, smelting and casting technology in vacuum, heat thermo-magnetic treatment of castings and their specialized machining and optical treatments. A new product was launched in the domestic market with significantly modified the geometry parameters and quality, to date not produced. Achieved economic effects are caused by the reduction of discards of extremely expensive magneto-mirrors at various stages of their production, lowering material and labour costs.

Key words: AlNiCo alloy, magneto-mirrors, manufacturing technology, physical, magnetic and optical features, assessment criteria

1. WPROWADZENIE

Głównym zespołem optycznym koordynatora lotu rakiety jest obiektyw OE, natomiast jednym z podstawowych i bardzo ważnym elementem optycznym obiektywu OE jest zwierciadło sferyczne o powierzchni odbijającej, wykonanej techniką próżniowego naparo-

wywania aluminium i warstwy ochronnej krzemu na podłożu metalowe. Zwierciadło sferyczne zwane również magneto-zwierciadłem wykonane jest z materiału magnetycznego o nazwie AlNiCo. Na rys. 1 przedstawiono schemat układu optycznego obiektywu OE, natomiast na rys. 2 pokazano obiektyw OE z zamontowanym magneto-zwierciadłem.



Rys. 1. Schemat układu optycznego obiektywu OE. (Kolorem czerwonym zaznaczone położenie magneto-zwierciadła w układzie optycznym obiektywu OE)

Fig. 1. Scheme of the lens optical system OE. (The red colour shows the location of magneto-mirror in the lens optical system OE)



Rys. 2. Obiektyw OE z zamontowanym magneto-zwierciadłem

Fig. 2. OE lens with a magneto-mirror mounted

Magneto-zwierciadło pełni rolę wirnika silnika napędowego giroskopu oraz zwierciadła pierwotnego w optycznym układzie wychwytywania promieniowania i skupiania go na elementach fotoczułych. Ta wielozadaniowość i różnorodność pełnionych funkcji jest powodem stawianych mu bardzo wysokich wymagań w zakresie następujących właściwości:

- mechanicznych; w szczególności dobrego wyważenia zwierciadła, dla zminimalizowania bicia mechanicznego względem osi obrotu, które znacznie pogarsza obrazowanie obiektu przez układ optyczny na detektorach,
- magnetycznych; o dużej jednorodności, celem utworzenia równomiernego pola magnetycznego dla rotora giroskopu, w zakresie utrzymywania jego stałych obrotów, co warunkuje jakość skanowania przestrzeni obrazowej oraz
- optycznych; ponieważ wysoka jakość powierzchni optycznej zwierciadła zapewnia odbicie padającej

wiązki promieni w kierunku dośrodkowym, a lustrzana jakość powierzchni zwierciadła decyduje o jakości obrazu wykrywanego obiektu.

Podstawowym stopem stosowanym do produkcji magnesów trwałych jest AlNiCo400 o następującym orientacyjnym składzie chemicznym: Al ~8%, Ni ~14%, Co ~24%, Cu ~3%, Fe-reszta. W składzie podane są przybliżone zawartości poszczególnych składników, ponieważ parametrem decydującym o przydatności tego stopu do określonych zastosowań są jego właściwości magnetyczne.

Na wartość właściwości magnetycznych, oprócz składu chemicznego stopu, ma wpływ również jego czystość metalurgiczna pod względem zawartości gazów i wtrąceń niemetalicznych oraz struktura, która zależy od technologii wytapiania i odlewania, a także rodzaj obróbki termomagnetycznej i obróbki cieplnej.

Do tej pory badania nad technologią wykonania magneto-zwierciadeł ze stopu AlNiCo 400 o zbliżonym przeznaczeniu, prowadzone były w roku 1978 przez IMŻ, jednak dotyczyły one wyrobów o znacznie łagodniejszych wymaganiach.

Aktualnie, wymagania odnośnie jakości tych wyrobów zostały istotnie zaostrzone, praktycznie muszą być one bez wad powierzchniowych oraz wewnętrznych. Dopuszcza się jedynie wady krytycznej wielkości, które są usuwalne podczas szlifowania powierzchni lustrzanej. Ostateczna wartość strumienia magnetycznego po zakończeniu obróbki mechanicznej nie może być mniejsza niż 122 μWb . Wytrzymałość zwierciadła określana jest poprzez jego dwukrotne rozpędzenie do prędkości 12000 obr./min. w czasie około 5 sekund.

Próby stosowania magneto-zwierciadeł wykonanych według opracowanej, wcześniejszej i jedynej technologii, do aktualnie wytwarzanych obiektywów koordynatora lotu wykazały, że technologia ta zapewnia wykorzystanie tylko do 30% magneto-zwierciadeł z całego procesu ich wytwarzania.

Przedstawione powyżej kryteria jakościowe, które muszą być spełnione dla magneto-zwierciadeł wymusiły zastosowanie innowacyjnej metodyki badawczej oraz innowacyjnej technologii obejmującej pełny cykl wytwarzania produktu, który charakteryzuje się:

- zmodyfikowanym składem chemicznym stopu, między innymi umożliwiającym poprawę szlifowalności wyrobu oraz bardzo niską zawartością gazów w stopie,
- brakiem widocznych gołym okiem wżerów, wtopień piasku formierskiego oraz wykruszeń na obwodzie wyrobu,
- zwartą i jednorodną strukturą bez pustek i jam skurczowych,
- właściwym kierunkiem wzrostu kryształów, zapewniającym optymalne usytuowanie domen w zwierciadle,
- małą zawartością wtrąceń niemetalicznych możliwą do osiągnięcia w procesie próżniowego wytapiania i odlewania.

Wytwarzanie materiału w postaci stopu specjalnego AlNiCo na magneto-zwierciadła oparto o nowoczesną technologię wytapiania i odlewania w próżni, specjalistyczną obróbkę cieplną i termomagnetyczną odlewów oraz specjalistyczną obróbkę mechaniczną.

Podstawowa selekcja jakości odlewu magneto-zwierciadła wykonywana jest w Instytucie Metalurgii Żelaza oraz w Zakładzie Magnon Sp. z o.o. w Gliwicach. Ko-

lejna selekcja jakościowa wykonywana jest w MESKO S.A., na poszczególnych etapach obróbki mechanicznej. Ostateczna kontrola jakości magneto-zwierciadeł przed ich zabudową w obiektywie koordynatora lotu wyrobu specjalnego ma miejsce w CRW Telesystem – Mesko w Warszawie.

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem realizowanego projektu było opracowanie kompleksowej technologii wytwarzania magneto-zwierciadła, które jest podstawowym elementem inteligentnego obiektywu koordynatora lotu rakiety przeciwlotniczej.

Realizacja badań ukierunkowana była na poprawę jakości pierścieni magneto-zwierciadeł, poprzez zastosowanie nowych technologii do ich produkcji, aby maksymalnie ograniczyć ich odrzut na poszczególnych etapach wykonania.

Wyznaczone bardzo wysokie kryteria jakości metalurgicznej magneto-zwierciadła wymusiły wielokierunkowe działania badawcze w obszarze: modyfikacji składu stopu specjalnego, technologii wytapiania i odlewania w próżni, obróbki cieplnej i termomagnetycznej odlewów oraz specjalistycznej obróbki mechanicznej i optycznej.

Część badawcza projektu obejmowała następujące grupy zagadnień:

- modyfikację składu chemicznego stopu specjalnego, zapewniającego otrzymanie wymaganych właściwości magneto-zwierciadła,
- wytwarzanie stopu AlNiCo, o określonym składzie chemicznym w zakresie: opracowania technologii wytapiania stopu w próżni, opracowania konstrukcji form odlewniczych, doboru materiałów na formy, określenia pracy cieplnej form, opracowania technologii odlewania na wymagany kształt wyrobu,
- technologię obróbki cieplnej i termomagnetycznej magneto-zwierciadła,
- technologię obróbki mechanicznej magneto-zwierciadła,
- technologię obróbki optycznej magneto-zwierciadła,
- ocenę wykonanych odlewów przeznaczonych na magneto-zwierciadła, jak również gotowych elementów, w oparciu o badania:
 - makro- i mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych i magnetycznych,
 - badania porowatości i czystości metalurgicznej magneto-zwierciadła,
 - badania kierunku wzrostu kryształów i usytuowania domen w zwierciadle,
 - wyznaczenie korelacji struktury oraz właściwości magnetycznych zwierciadła,
 - badania jakości lustrzanej magneto-zwierciadła.

Ostateczną weryfikacją przeprowadzonych badań były próby testujące magneto-zwierciadła na prototypowych odlewach wykonanych zgodnie z zaleceniami i wnioskami z poszczególnych etapów realizacji projektu.

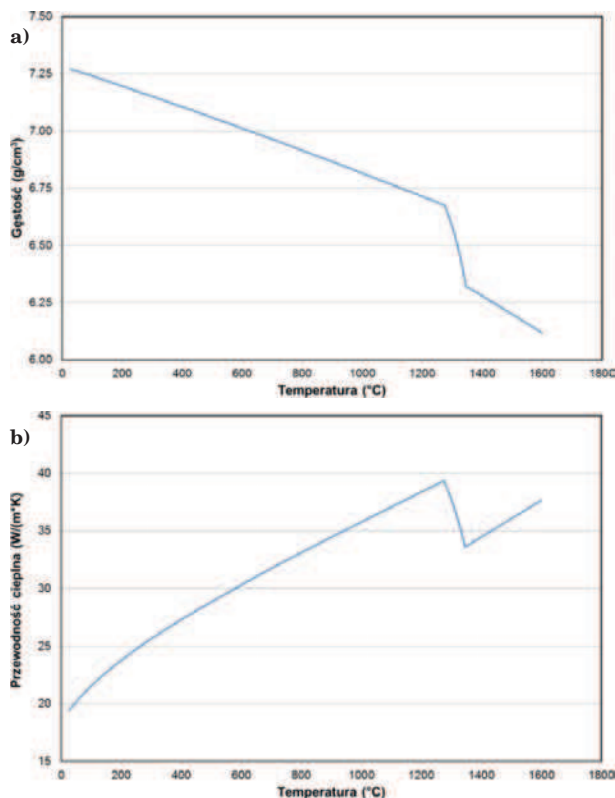
Wynikiem wykonanych badań było opracowanie kompleksowych procedur technologicznych wytwarzania magneto-zwierciadeł dla potrzeb MESKO S.A. oraz wytworzenie serii przemysłowej zgodnie z opracowaną technologią.

3. BADANIA PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI STOPU

3.1. WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNE STOPU ALNiCO400

Dla celów projektowania technologii: wykonania formy (zasilania wnęki), technologii wytapiania stopu w próżniowym piecu indukcyjnym i zalewania formy oraz określenia parametrów odlewania stopu AlNiCo, wykonano symulacje numeryczne umożliwiające uzyskanie danych pozwalających optymalizować procesy technologiczne jak i procesy zachodzące w trakcie krystalizacji odlewów w formie. Przeprowadzenie takich symulacji wymagało znajomości danych fizykochemicznych uzyskanych w wyniku eksperymentu przy użyciu aparatury (termoanalyzer wraz z oprogramowaniem) lub specjalistycznych programów komputerowych.

Właściwości stopu w procesie nagrzewania lub krzepnięcia ulegają istotnym zmianom, szczególnie w zakresie temperatur solidus i likwidus. Znajomość tych zmian ma istotne znaczenie technologiczne, ponieważ umożliwia: wyznaczenie stopnia przegrzania kąpieli metalowej do zalewania, obliczenie wartości skurczu objętościowego stopu w formie odlewniczej, a tym samym jej zaprojektowanie, a także czasu rozbrajania formy. Obliczenia właściwości termofizycznych stopu AlNiCo przeprowadzono z wykorzystaniem programu JMatPro. W przeprowadzonej symulacji wyznaczono podstawowe parametry technologiczne w funkcji temperatury (Rys. 3): gęstości stopu (a), rozszerzalności liniowej, objętości molowej, lepkości stopu, przewodności cieplnej (b), ciepła właściwego i rozszerzalności cieplnej.



Rys. 3. Obliczone zależności zmiany współczynnika gęstości (a) oraz przewodności cieplnej (b) w funkcji temperatury

Fig. 3. The calculated dependence of changes in density (a) and thermal conductivity (B) as a function of temperature

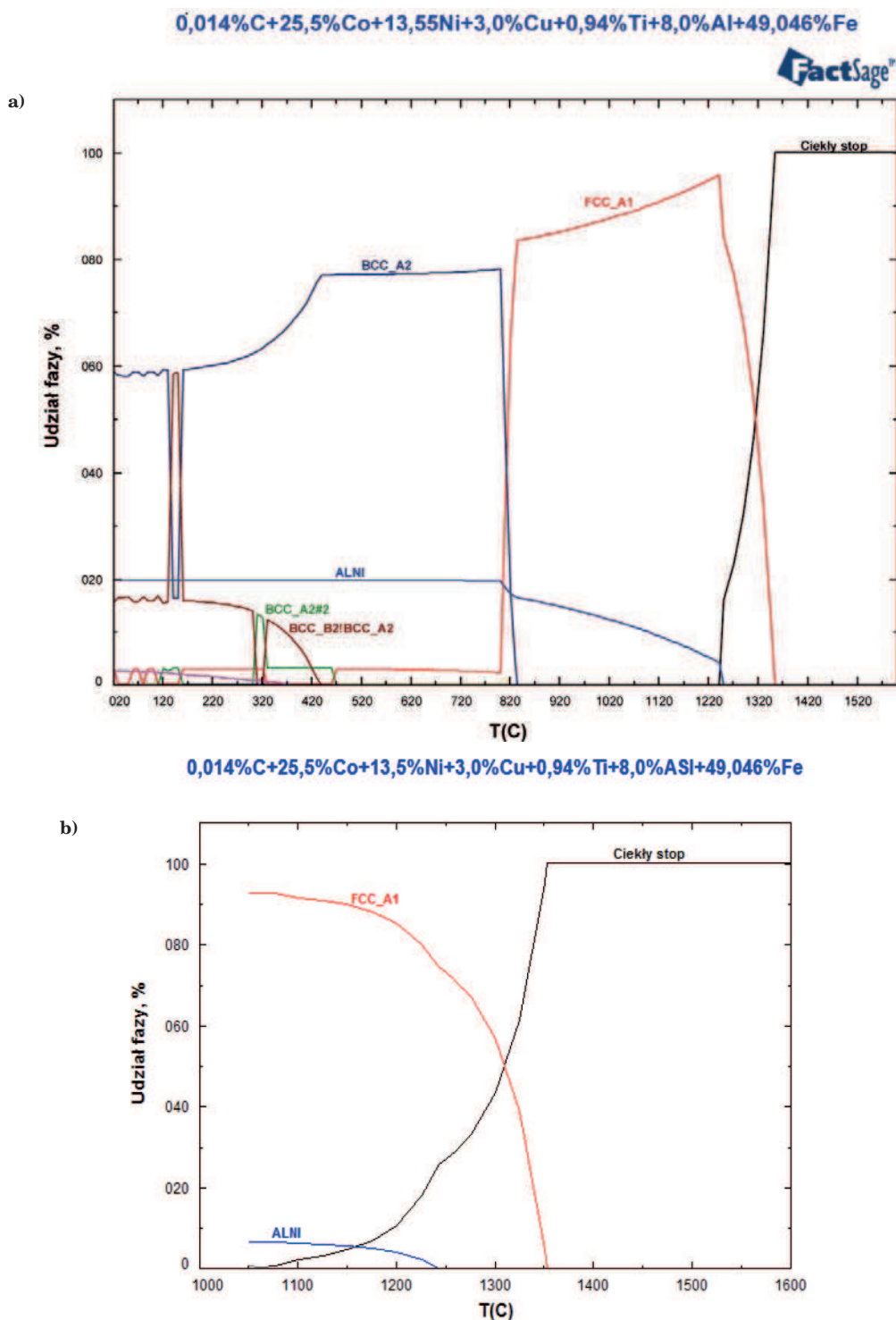
Z opracowanych wykresów można określić temperaturę solidus i likwidus dla badanego stopu. Temperatury te odzwierciedlają dwa wyraźne „załamania” w przebiegu krzywych obrazujące początek i koniec procesu roztapiania.

3.2. PRZEBIEG PROCESU KRZEPNIĘCIA

Celem określenia przebiegu (temperatur) krzepnięcia stopu AlNiCo, wykonano symulację za pomocą progra-

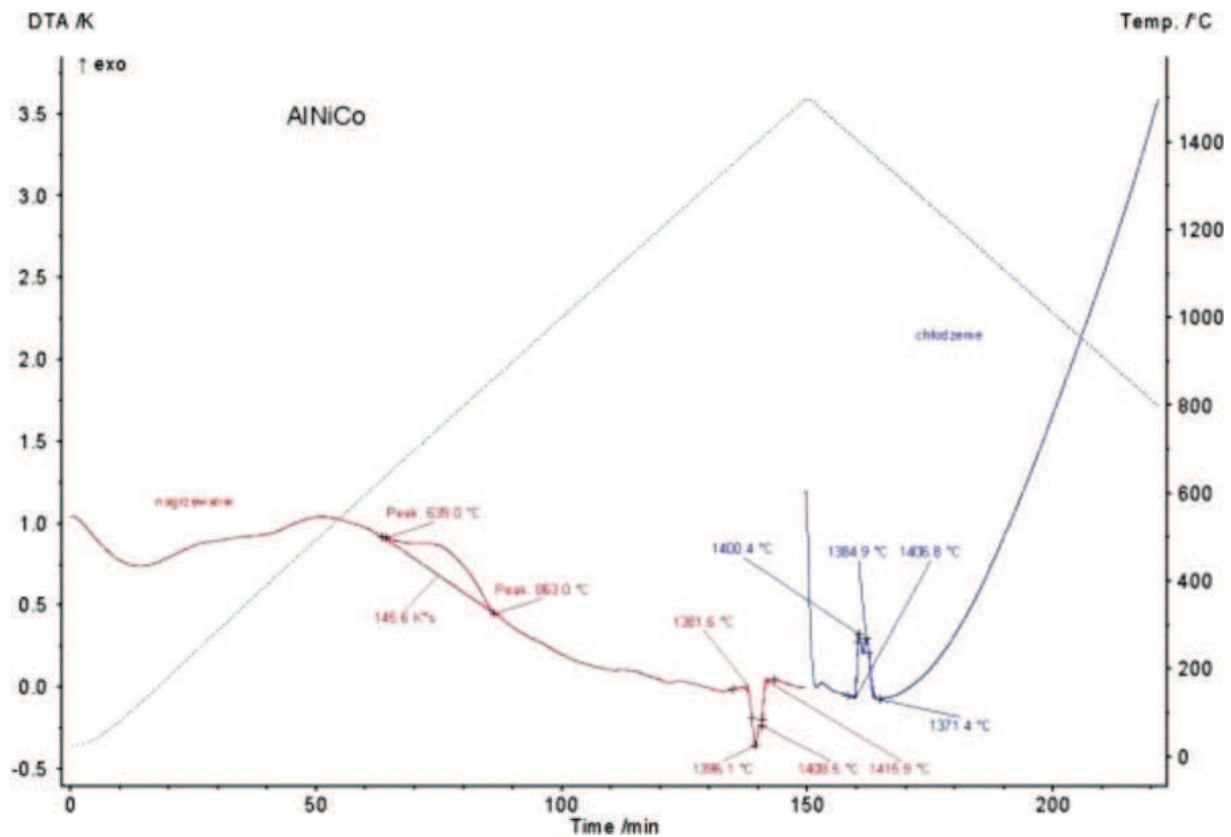
mu termochemicznego FactSage 6.4, z wykorzystaniem bazy danych FSstel (Rys. 4), według dwóch modeli: modelu równowagowego (Rys. 4a) i modelu Scheila-Gulivera (Rys. 4b).

Ze względu na istotne różnice temperatury solidus występujące w symulacji numerycznej według modelu równowagowego oraz Schel-Gulivera, konieczna była weryfikacja temperatury krzepnięcia stopu metodą symulacji fizycznej, za pomocą analizy termicznej i określenie krzywej DTA stopu AlNiCo.



Rys. 4. Symulacja przebiegu krzepnięcia stopu Fe-Co-Ni-Al-Cu według modelu równowagowego (a) oraz wg modelu Scheila-Gulivera (b)

Fig. 4. Simulation of solidification of the alloy Fe-Co-Ni-Al-Cu according to: the equilibrium model (a) and the Scheil-Guliver model (b)



Rys. 5. Zmiany termicznej analizy różnicowej (DTA) w zależności od czasu i temperatury podczas ogrzewania i chłodzenia próbki stopu AlNiCo (według zadanego programu temperaturowego)

Fig. 5. Changes in differential thermal analysis (DTA) depending on the time and temperature during the heating and cooling of the sample of AlNiCo alloy (at a predefined temperature program)

3.3. RÓŻNICOWA ANALIZA TERMICZNA

Badania przeprowadzono metodą różnicowej analizy termicznej (DTA) w atmosferze obojętnej. Na rys. 5 przedstawiono wynik eksperymentu, w postaci zmian sygnału DTA w układzie czas i temperatura.

Jak wynika z badań DTA otrzymane wyniki zmiany stanu skupienia przedstawione na wykresie (Rys. 5) istotnie różnią się od wyników symulacji numerycznych wykonanych programem Thermo-Calc ora IMat Pro. Temperatury przemian wyznaczone metodą DTA nie odpowiadają temperaturom równowagi termodynamicznej i od nich odbiegają, ponieważ jest to metoda dynamiczna, w której nie osiąga się stanu równowagi.

Dla celów technologicznych przyjęto temperatury początku i końca roztopienia stopu AlNiCo wyznaczone metodą DTA, opartą o warunki rzeczywiste, jako temperatury: solidusu 1381°C oraz likwidusu – 1416°C.

4. TECHNOLOGIA WYTWARZANIA MAGNETO-ZWIERCIADEŁ

4.1. BADANIA PROCESU ODLEWANIA PIERŚCIENI I OPRACOWANIE OPTIMALNEJ KONSTRUKCJI FORMY ODLEWNICZEJ

Duży wpływ na otrzymanie odlewu bez wad ma technologia wykonania formy odlewniczej, w tym rodzaj i właściwości mas formierskich stosowanych do wykonania formy, jak również sposób jej przygotowania do procesu odlewania. Istotne znaczenie dla procesu wypełniania wnęki formy ciekłym stopem oraz

na przebieg procesu krzepnięcia odlewów ma również technologia zalewania formy, tj. czas, prędkość zalewania oraz temperatura przegrzania stopu powyżej temperatury likwidus. Przeprowadzenie badań tych parametrów było jednym z czynników, które posłużyły do opracowania udoskonalonej technologii wykonania odlewów magneto-zwierciadeł o wysokiej jakości.

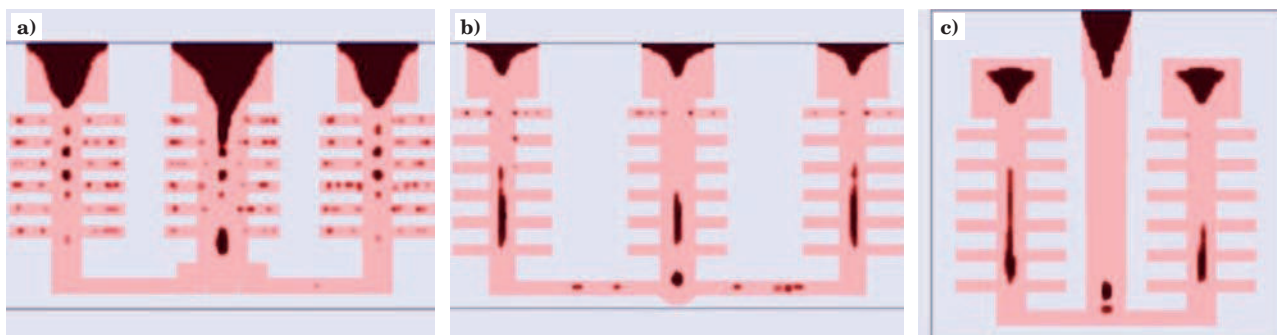
W ramach prac nad technologią formy, przeprowadzono badania procesu wypełnienia wnęki formy oraz krystalizacji odlewu z kształtowaniem pola temperatury w formie i w odlewie, w oparciu o fizyczne modelowanie z użyciem programów Nova Flow & Solid oraz Fluent, prowadzące do doboru układu zasilania formy. Celem tych badań było określenie najkorzystniejszych parametrów odlewania, w oparciu o wyniki komputerowej symulacji procesu zalewania i krzepnięcia odlewu. Symulacji poddano różne rodzaje form o zmiennych parametrach:

- geometrii wnęki formy wraz z układem wlewowym,
- temperatury zalewania,
- osnowy masy formierskiej.

Do badań opracowano dwie koncepcje geometrii formy:

- wariant I – forma składająca się z trzech niezależnych stosów odlewniczych dla poszczególnych zespołów odlewów i niecentrycznego syfonowego układu wlewowego,
- wariant II – forma „monolityczna”, w której wnęka składa się z czterech zespołów modelowych zasilanych centrycznie syfonowym układem wlewowym.

Badaniom poddano 4 rodzaje masy formierskiej, w następujących wariantach:



Rys. 6. Wyniki symulacji dla różnych układów odlewniczych: a) forma z masy kwarcowej, b) forma z węglika krzemu, wg wariantu I – zalewanie z większą prędkością, c) forma z węglika krzemu, wg wariantu II – zalewanie z mniejszą prędkością

Fig. 6. The simulation results for different casting systems: a) mold from quartz sand, b) mold from silicon carbide, acc. to variant I – pouring with greater speed, c) mold from silicon carbide, acc. to variant I – pouring with slower speed

- wariant I (dotychczasowy) – masa kwarcytowa,
- wariant II – masa chromitowa,
- wariant III – masa korundowa,
- wariant IV – masa z węglika krzemu,

Wariant I określono jako „dotychczasowy” („bazowy”), ponieważ był on stosowany w technologii wykonywania odlewów pierścieni magnesów na dotychczasowe zamówienia z MESKO S.A.

Doboru konstrukcji formy i prędkości zalewania dokonano na podstawie oceny ilości, wielkości i rozkładu wad pochodzenia skurczowego w odlewie. Na podstawie analizy wyników symulacji stwierdzono, że dla postawionych wymagań możliwe jest uzyskanie odlewów bez wad skurczowych (ciemny kolor na rys. 6) tylko przy zastosowaniu masy formierskiej na osnowie z węglika krzemu, dla określonych założeń geometrycznych wnętrza formy. Istotnym parametrem wpływającym na ilość i usytuowanie wad jest prędkość zalewania determinowana czasem zalewania. Na rys. 6. pokazano przykładowe wyniki symulacji dla form, różniących się składem masy formierskiej, geometrią wnętrza formy oraz prędkością zalewania. Z badań wynika, że najkorzystniejsze umiejscowienie wad skurczowych wystąpiło w formie monolitycznej (wersja II), wykonanej z masy z węglika krzemu, przy mniejszej prędkości zalewania formy (Rys. 6c).

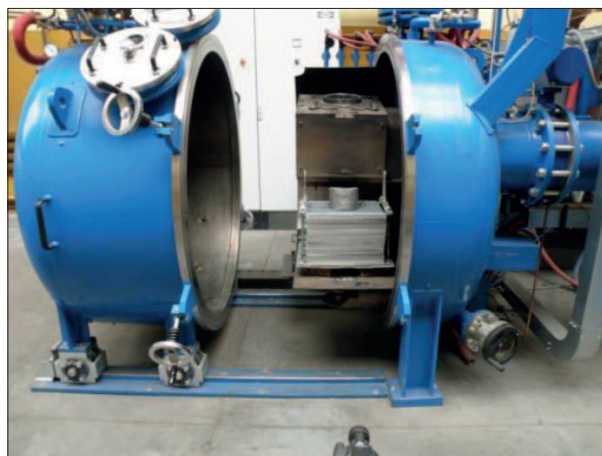
4.2. OPRACOWANIE DOŚWIADCZALNEJ TECHNOLOGII ORAZ WYKONANIE WYTOPÓW, Z ODLANIEM PIERŚCIENI DO FORM

Do opracowania doświadczalnej technologii wytwarzania pierścieni magneto-zwierciadeł przyjęto następujący zakres składu chemicznego stopu AlNiCo400: Ni: 13,5÷14,0%; Cu: 2,7÷3,0%; Al: 7,5÷8,0%; Ti: 0,5÷1,0%, C: < 0,017%, Co: 24,0÷25,5%, S: 0,15÷0,2%; N₂: < 0,0025%; Fe: reszta. Do stopu wprowadzano następujące modyfikatory: tytan – w ilości 0,5÷1,0% oraz siarkę – w ilości do 0,2%.

W pierwszym etapie projektu, badania nad technologią wytapiania i odlewania pierścieni magneto-zwierciadeł realizowano w próżniowym piecu indukcyjnym VSG 50. W kolejnym etapie projektu badania kontynuowano z zastosowaniem nowo uruchomionego w IMŻ, próżniowego pieca indukcyjnego nowej generacji VIM Lab 30, produkcji firmy SECO/WARWICK.

Piec ten stanowi nowy poziom rozwiązań konstrukcyjnych w obszarze high-technology, w szczególności w zakresie możliwości technologicznych, komputerowo-

wego sterowania procesem, jak również archiwizacji danych (Rys. 7).



Rys. 7. Stanowisko próżniowego pieca indukcyjnego VIM lab 30

Fig. 7. The stand of the vacuum induction furnace VIM lab30

Wsad do pieca zestawiano z materiałów o dużej czystości i znanym składzie chemicznym. Podstawowy wsad stanowiło żelazo armco, natomiast dla uzyskania wymaganego składu chemicznego stopu, stosowano czyste metale w postaci: niklu katodowego, kobaltu katodowego, miedzi i aluminium. Jako modyfikatory stosowano: tytan metaliczny i siarkę czystą. Część wytopów wykonano jako tzw. „odzyskowe”, tj. z zastosowaniem złomu z odpadów stopu AlNiCo. Wsad podstawowy oraz część dodatków metalicznych (nikiel i kobalt) ładowano do tygła pieca, pozostałe składniki (miedź, aluminium, tytan, siarka) rozmieszczano w zasobniku, w kolejności odpowiadającej późniejszemu ich wprowadzaniu do kąpiel. Po załadowaniu tygła, na odlewniczym stole obrotowym w komorze pieca, umieszczano wysuszoną formę odlewniczą, dostosowując ułożenie otworu wlewowego formy do rynny odlewniczej tygła (Rys. 7). Formę bezpośrednio przed wstawieniem do pieca wygrzewano w piecu oporowym do temperatury około 150°C.

Masy wsadu w poszczególnych wytopach wynosiły 21÷24 kg i były mniejsze od nominalnej masy wsadu dla dysponowanego tygła pieca – wynoszącej około 28 kg. Mniejsze masy wsadu wynikały z określonej „pojemności” formy odlewniczej, wynikającej z kolei z jej

ograniczeń gabarytowych oraz możliwości rozmieszczenia odlewów w stosie odlewniczym.

Roztapianie wsadu – w początkowym etapie – prowadzono w próżni, a z chwilą pojawienia się na dnie tygla „jeziorka ciekłego metalu”, w atmosferze argonu.

Odgazowanie kąpieli prowadzono przy wysokiej próżni, wynoszącej ok. 0,2÷0,4 mbara, przez okres 20 minut, aż do całkowitego uspokojenia kąpieli.

Kolejnym etapem procesu, było wytworzenie atmosfery argonowej w piecu i wprowadzenie dodatków stopowych, w postaci odpowiedniej ilości aluminium, miedzi, tytanu i siarki, mieszając kąpiel po każdym dodatku – dla całkowitego jego rozpuszczenia się oraz ujednorodnienia kąpieli.

Po wprowadzeniu dodatków regulowano temperaturę kąpieli do wymaganej do odlewania, pobierano próbki stali do analizy składu chemicznego i przystępowano do odlewania wytopu.

Odewanie stopu do formy odlewniczej prowadzono przy zamkniętej komorze, w atmosferze argonu, przy ciśnieniu około 300 mbar. Temperatury odlewania w poszczególnych wytopach badawczych wahały się w granicach 1503÷1568°C. Odlewanie prowadzono w sposób szybki i ciągły w czasie 10÷15 sek., z pełnym zalaniem leja wlewowego (wlewu głównego). Otwarcie pieca i wyjęcie zalanej formy z pieca następowało po całkowitym jej wystygnięciu, tj. po około 20 godzinach od odlewania. Formę rozbrajano w stanie zimnym na powietrzu.

Zestawienie wytopów badawczych wykonanych w ramach realizacji projektu w obydwu jednostkach piecowych, według różnych wariantów technologicznych zawiera tabela 1.

4.3. BADANIA DOŚWIADCZALNE ODLEWANIA STOPU

Wykonanie wytopów w piecu próżniowym i zalewania metalu do form w warunkach obniżonego ciśnienia, przy zamkniętej komorze pieca, wymagało zaprojektowania stosu formierskiego i układu wlewowego, który powinien charakteryzować się:

- małymi gabarytami, dostosowanymi do objętości pieca,
 - odpowiednią konstrukcją i maksymalnym zagęszczeniem w rozmieszczeniu odlewów, dla odlania jak największej ilości metalu, co jest podyktowane pojemnością tygla pieca,
 - możliwie dużym uzyskiem odlewów.
- Dla otrzymania odlewów z jak najmniejszą ilością wad założono zastosowanie:
- mas formierskich, które powinny charakteryzować się: dużą ognioodpornością, dobrą przepuszczalnością gazów i niską emisją gazów – dla wyeliminowania pęcherzy gazowych w odlewach, jak również dobrą wytrzymałością mechaniczną w stanie wilgotnym i suchym układzie,
 - układu wlewowego, który doprowadziłby metal do wnętrza formy bez zawirowań oraz stanowił układ zasilający odlewy w czasie krzepnięcia.

Technologia doświadczalna wykonania formy obejmowała: zaprojektowanie stosu formierskiego, wykonanie modeli odlewów, przygotowanie mas formierskich do formowania, zaformowanie stosu odlewniczego metodą ubijania masy formierskiej wokół modeli, suszenie formy w temperaturze ok. 150°C przez kilkanaście godzin. Dla określenia właściwości zastosowanych mas

Tabela 1. Zestawienie wykonanych wytopów badawczych

Table 1. Summary of completed research heats

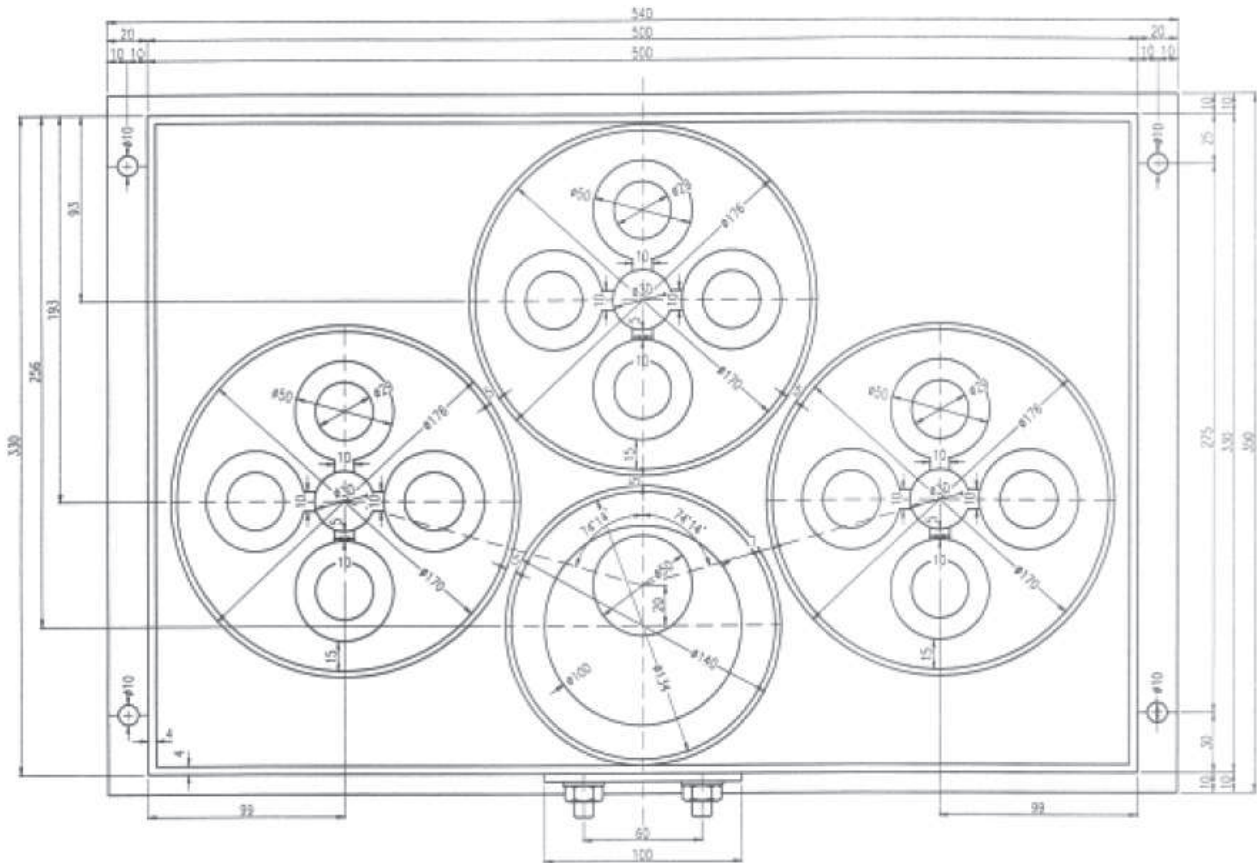
Lp.	Nr Wytoku	Rodzaj pieca	Materiał formy	Wariant wykonania formy	Wersja geometrii pierścieni
1	1422	VSG 50	kwarcyt		Wersja II
2	1464	VSG 50	chromit		Wersja II
3	1465	VSG 50	kwarcyt		Wersja II
4	1466	VSG 50	kwarcyt		Wersja II
5	1467	VSG 50	chromit		Wersja II
6	1468	VSG 50	chromit		Wersja II
7	1469	VSG 50	chromit		Wersja II
8	1470	VSG 50	chromit		Wersja II
9	1471	VSG 50	węglik krzemu		Wersja II
10	1472	VSG 50	korund		Wersja II
11	1473	VSG 50	węglik krzemu		Wersja II
12	1474	VSG 50	chromit		Wersja II
13	N 28	VIM 30	węglik krzemu	Wariant I	Wersja III
14	N 29	VIM 30	węglik krzemu	Wariant I	Wersja III
15	N 30	VIM 30	węglik krzemu	Wariant I	Wersja III
16	N 35	VIM 30	węglik krzemu	Wariant I	Wersja III
17	N 40	VIM 30	węglik krzemu	Wariant II	Wersja IV
18	N 41	VIM 30	węglik krzemu	Wariant II	Wersja IV
19	N 42	VIM 30	węglik krzemu	Wariant II	Wersja IV
20	N 45	VIM 30	węglik krzemu	Wariant II	Wersja IV
21	N 48	VIM 30	węglik krzemu	Wariant II	Wersja IV
22	N 49	VIM 30	węglik krzemu	Wariant II	Wersja II + IV

formierskich, przeprowadzono również badania ich składów ziarnowych i gęstości nasypowej oraz przewodności cieplnej.

Projekt techniczny formy z niezależnymi stosami przedstawiono na rys. 8, natomiast na rys. 9 pokazano schematycznie geometrię wnętrza formy „monolitycznej” oraz sposób rozprowadzenia metalu do poszczególnych stosów formy. Na rys. 10 i 11 pokazano wykonane for-

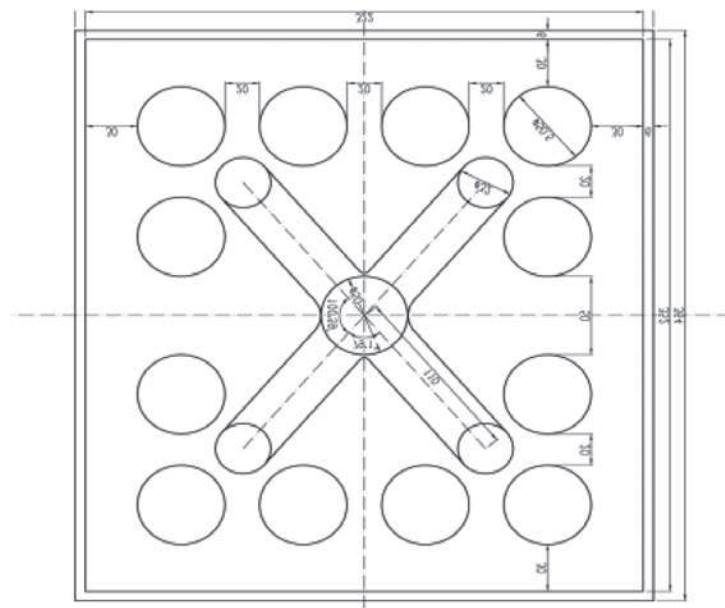
my, przygotowane do przeprowadzenia testów sprawdzających odlewanie pierścieni w piecu VIM30.

Dla obydwu rodzajów form przeprowadzono termowizyjne badania rozkładu pola temperaturowego na powierzchni zestawów odlewniczych po odlaniu wytopu i wyjęciu formy z pieca. Na rys. 12 pokazano przykładowe termogramy badanej powierzchni formy z trzema niezależnymi stosami i formy monolitycznej.



Rys. 8. Projekt formy odlewniczej z trzema niezależnymi stosami

Fig. 8. The project of the mould with three independent stacks



Rys. 9. Projekt formy monolitycznej z czterema zespołami modelowymi

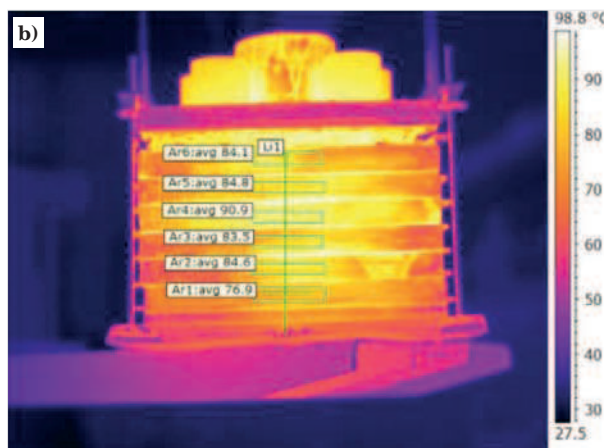
Fig. 9. The project of the "monolithic" mould with four model units



Rys. 10. Forma odlewnicza z trzema niezależnymi stosami
Fig. 10. The mould with three independent stacks



Rys. 11. Forma odlewnicza „monolityczna”
Fig. 11. The “monolithic” mould



Rys. 12. Termogram obrazujący rozkład pola temperaturowego a) forma z trzema niezależnymi stosami, b) forma „monolityczna”

Fig. 12. The thermogram showing the distribution of temperature field: a) the form of three independent stacks, b) the “monolithic” form



Rys. 13. Stos odlewów po częściowym rozbiciu formy, z wytopu odlanego do formy „monolitycznej”

Fig. 13. Stack of castings after partial dismantling of forms, from heat cast to “monolithic” form

Przeprowadzone badania wykazały, że w formie odlewniczej z niezależnymi stosami występowały niestabilizowane warunki brzegowe (Rys. 12a), w zakresie odprowadzenia ciepła na poszczególnych poziomach ramek, co miało wpływ na przebieg procesu krystalizacji i stygnięcia odlewów wewnątrz formy. Było to przyczyną powstawania naprężeń własnych w odlewie, co skutkowało pękaniem odlewów. Forma odlewnicza „monolityczna” (wariant II) charakteryzowała się mniejszymi wartościami gradientu temperatury pomiędzy monitorowanymi stronami formy i panowały w niej ustabilizowane warunki brzegowe odprowadzenia ciepła (Rys. 12b). Wyniki badań termowizyjnych, jak również przeprowadzona ocena wzrokowa pierścieni odlanych do obydwu rodzajów form pozwoliła na wybór do dalszych badań formy monolitycznej, zapewniającej dobrą jakość odlewów. Forma ta umożliwia odlanie 72 szt. pierścieni o łącznej masie ok. 7 kg.

Na rys. 13 pokazano stos odlewów z wytopu odlanego do formy „monolitycznej”, z zastosowaniem masy formierskiej z węglika krzemu.

Zastosowana forma z syfonowym układem wlewowym, jak również zastosowane parametry odlewania, takie jak: szybkość odlewania oraz temperatura odlewania, pozwoliły na dobre zalanie formy, bez tzw. „nie-dolewów”.

4.4. OPACOWANIE DOŚWIADCZALNEJ TECHNOLOGII OBRÓBKII CIEPLNEJ I TERMOMAGNETYCZNEJ ODLEWÓW

Warunkiem otrzymania wymaganych właściwości magnetycznych pierścieni jest prawidłowo przeprowadzona obróbka cieplna. Dla stopu AlNiCo opracowano technologię obróbki cieplnej w polu magnetycznym, polegającą na nagraniu stopu do temperatury 1250°C i chłodzeniu w polu magnetycznym o natężeniu 80÷240 kA/m. Szybkość chłodzenia w zakresie temperatur 600÷900°C nie powinna być większa od 10°C/s. W końcowym etapie stop poddaje się starzeniu przy temperaturze 540÷640°C w czasie do 36 h.

Technologia obróbki cieplnej odlewów doświadczalnych obejmowała:

- I etap – ujednorodnienie i odpuszczanie, przeprowadzone odpowiednio w piecu elektrycznym sylitowym i oporowym oraz obróbkę termomagnetyczną wykonywaną w magneśnicy rurowej,
- II etap – starzenie przeprowadzone w piecu oporowym.

4.5. BADANIA PROCESU ODLEWANIA STOPU PRZY ZMIENNYCH WARUNKACH KRZEPNIĘCIA

Celem tych badań było określenie wpływu parametrów odlewania stopu ALNICO na jego właściwości magnetyczne po obróbce cieplno-magnetycznej. Zakres badań obejmował:

- wykonanie symulacji fizycznych procesu odlewania stopu magnetycznego o ustalonym składzie chemicznym do form przy zmiennych warunkach chłodzenia,
- wykonanie badań metalograficznych oraz właściwości magnetycznych i mechanicznych.

Badania właściwości magnetycznych w materiale odlanym przy różnych warunkach krzepnięcia obejmowały: badania domen magnetycznych, remanencji magnetycznej, strumienia magnetycznego w przekroju roboczym, określenie wpływu dodatku siarki na kształ-

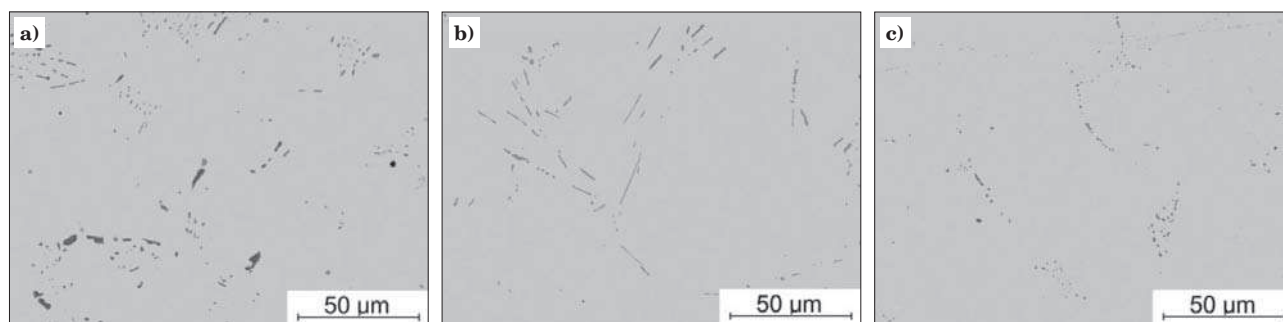
owanie się właściwości magnetycznych w materiale oraz badania wpływu typu mikrostruktury powstałej po procesie odlewania na właściwości magnetyczne i twardość odlanych pierścieni. Zbadano jak szybkość procesu krzepnięcia odlewów, z zastosowaniem różnych rodzajów mas formierskich, o różnych współczynnikach odbioru ciepła, których użyto w eksperymentach (Tab. 1), wpływa na kształtowanie się właściwości magnetycznych w pierścieniach.

W pierścieniach z wytopów odlanych do form z SiC zaobserwowano mniejsze ziarno, niż w przypadku wytopów odlanych do formy piaskowej, korundowej oraz formy chromitowej.

Wykonane badania makro i mikrostruktury oraz porowatości i wad w wybranych pierścieniach, wykazały, że jakość powierzchni pierścieni jest zróżnicowana w zależności od rodzaju zastosowanej masy formierskiej. Najgorszą jakość powierzchni wykazały pierścienie odlane do form piaskowej i chromitowej, które charakteryzowały się znaczną chropowatością i porowatością. Najlepszą gładkością powierzchni i najmniejszą liczbą „wypływek” charakteryzowały się pierścienie odlane do formy o wyłożeniu z węglika krzemu. Badania makrostruktury i porowatości w przekroju poprzecznym pierścieni wykazały również ich zróżnicowanie dla różnych mas formierskich, co przedstawiono na rys. 14 (obrazy czarne to powstałe pustki w pierścieniach).

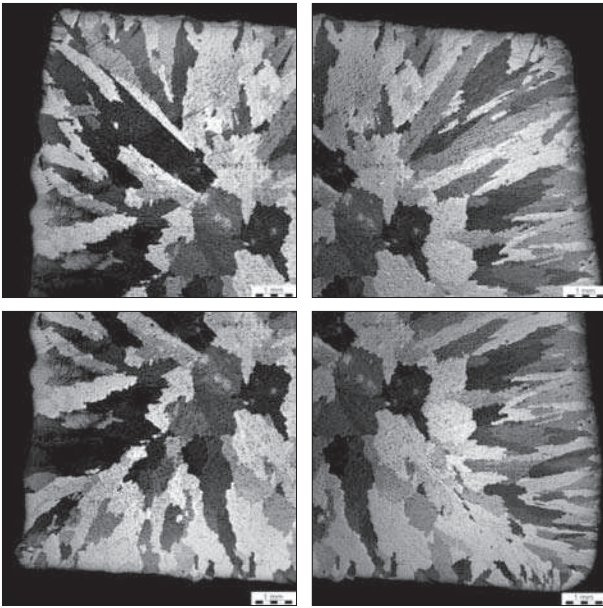
Najmniejsza porowatość i największa prędkość odprowadzania ciepła podczas stygnięcia wystąpiła w pierścieniach odlanych do formy z węglika krzemu (Rys. 14c). W odlanych pierścieniach dendryty słupkowe sięgały do środka ich przekroju poprzecznego i były dużo cieńsze niż w przypadku pierścieni odlanych do form: piaskowej, chromitowej lub korundowej (Rys. 15 i 16). Nie stwierdzono natomiast zależności tych cech od umiejscowienia pierścienia w stosie odlewniczym.

Na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych, za najlepszą do zastosowania uznano formę wyłożoną węglikiem krzemu, ze względu na najkorzystniejszą strukturę pierścieni i najmniejszą ilość wad występujących w pierścieniach, przy zachowaniu porównywalnych pozostałych parametrach ich wytwarzania. Wynik ten został potwierdzony w badaniach doświadczalnych przewodności cieplnej stosowanych mas formierskich i wyliczony – w oparciu o równanie Fouriera, współczynnik przewodności cieplnej, które wykazały, że największą przewodnością cieplną charakteryzuje się masa z węglika krzemu. W pierścieniach odlanych do tej formy najszybciej jest odprowadzane ciepło podczas stygnięcia krzepnącego metalu, co w konsekwencji

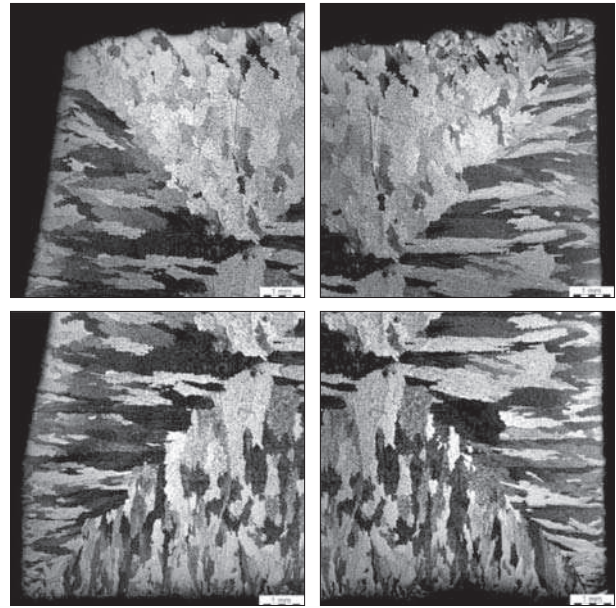


Rys. 14. Obraz powstałych pustek w pierścieniach odlanych do różnych form: a) masa kwarcowa b) masa korundowa c) masa na bazie SiC

Fig. 14. The image of voids created in the rings cast into various forms: a) the mass of quartz, b) corundum mass, c) mass based on SiC



Rys. 15. Struktura występująca na przekroju poprzecznym pierścienia z wytopu 1422 (forma piaskowa). Pow. 35×
Fig. 15. The structure occurring over the cross section of the ring, heat no. 1422, sand mould; magnification 35×



Rys. 16. Struktura występująca na przekroju poprzecznym pierścienia z wytopu 1471 (forma z węgla krzemu). Pow. 35×
Fig. 16. The structure occurring over the cross section of the ring, heat no. 1471, carborundum mould; magnification 35×

daje najniższą porowatość ze wszystkich przebadanych form. Pomimo tego, nie można uniknąć ujawniania się pewnych wad, głównie w postaci porów na poszczególnych etapach obróbki mechanicznej.

Zróznicowana wielkość ziarna w odlewach z poszczególnych wytopów spowodowała różnicę w kształtowaniu się właściwości magnetycznych materiału. W celu określenia właściwości magnetycznych, uwzględniając anizotropowość materiału po obróbce cieplno-magnetycznej, przeprowadzono badania półwyrobów pierścieni w trzech osiach próbek, metodą histerezy grafu. W tabeli 2 przedstawiono wybrane, z badanych wytopów, wyniki pomiarów wartości remanencji magnetycznej B_r , która jest wielkością charakterystyczną dla danego materiału.

Otrzymane wyniki potwierdziły, że badany materiał wykazuje silną anizotropowość magnetyczną, co świadczy o poprawności obróbki cieplno-magnetycznej.

Najwyższe wartości B_r zaobserwowano dla wytopów 1471 i 1473, co jest efektem mniejszych rozmiarów ziarn w materiale. Ziarno w tych wytopach, odlanych do form z masy z węgla krzemu było mniejsze niż w pozostałych, co korzystnie wpłynęło na właściwości magnetyczne materiału.

Wyniki pomiarów właściwości magnetycznych pokazały również, że osiągnięto dobre właściwości materiału, które nawet przy zmianie kształtu przekroju roboczego pierścieni magneto-zwierciadeł, w kierunku mniejszych ich przekrojów, pozwalają zapewnić wymaganą wartość strumienia magnetycznego.

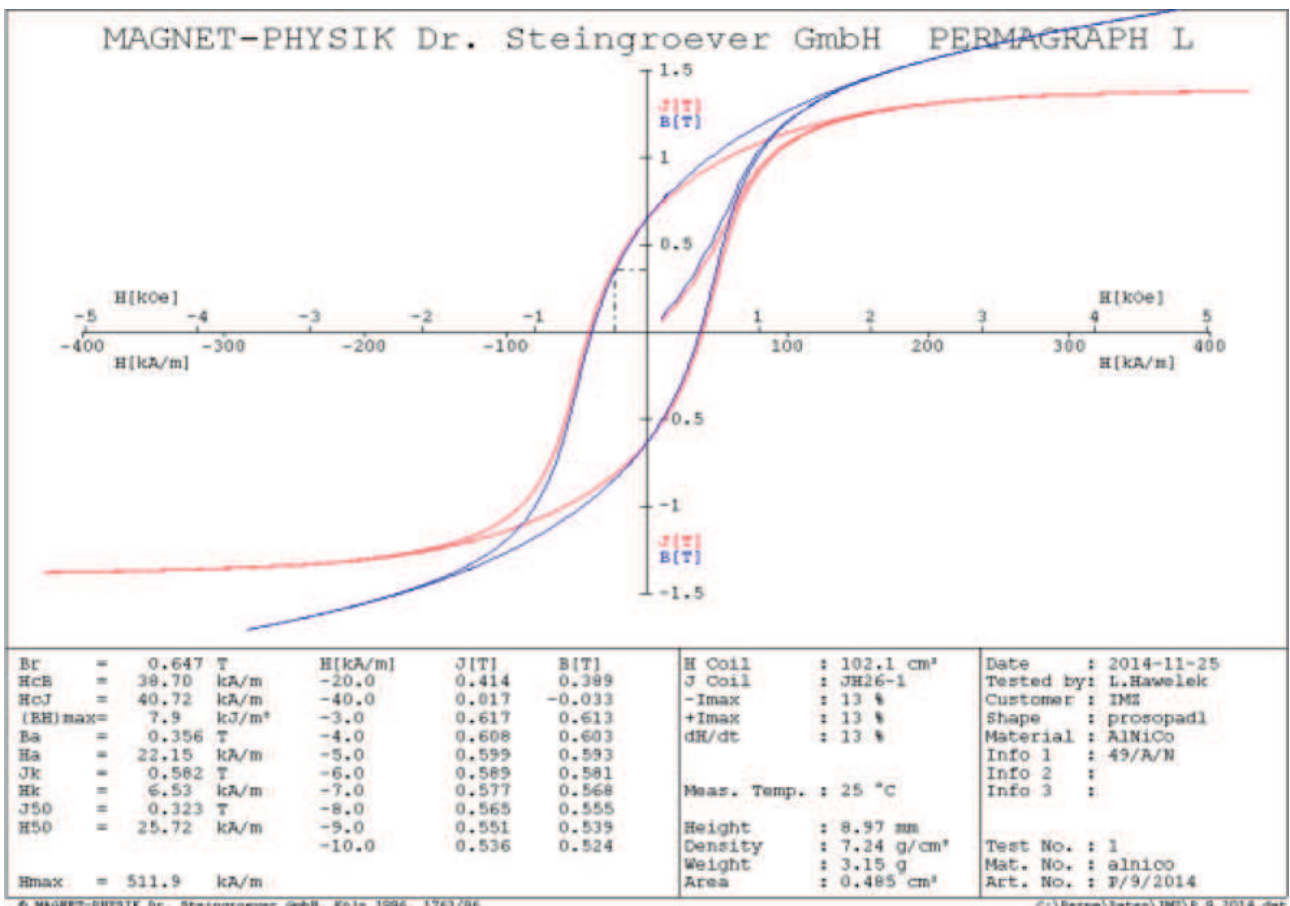
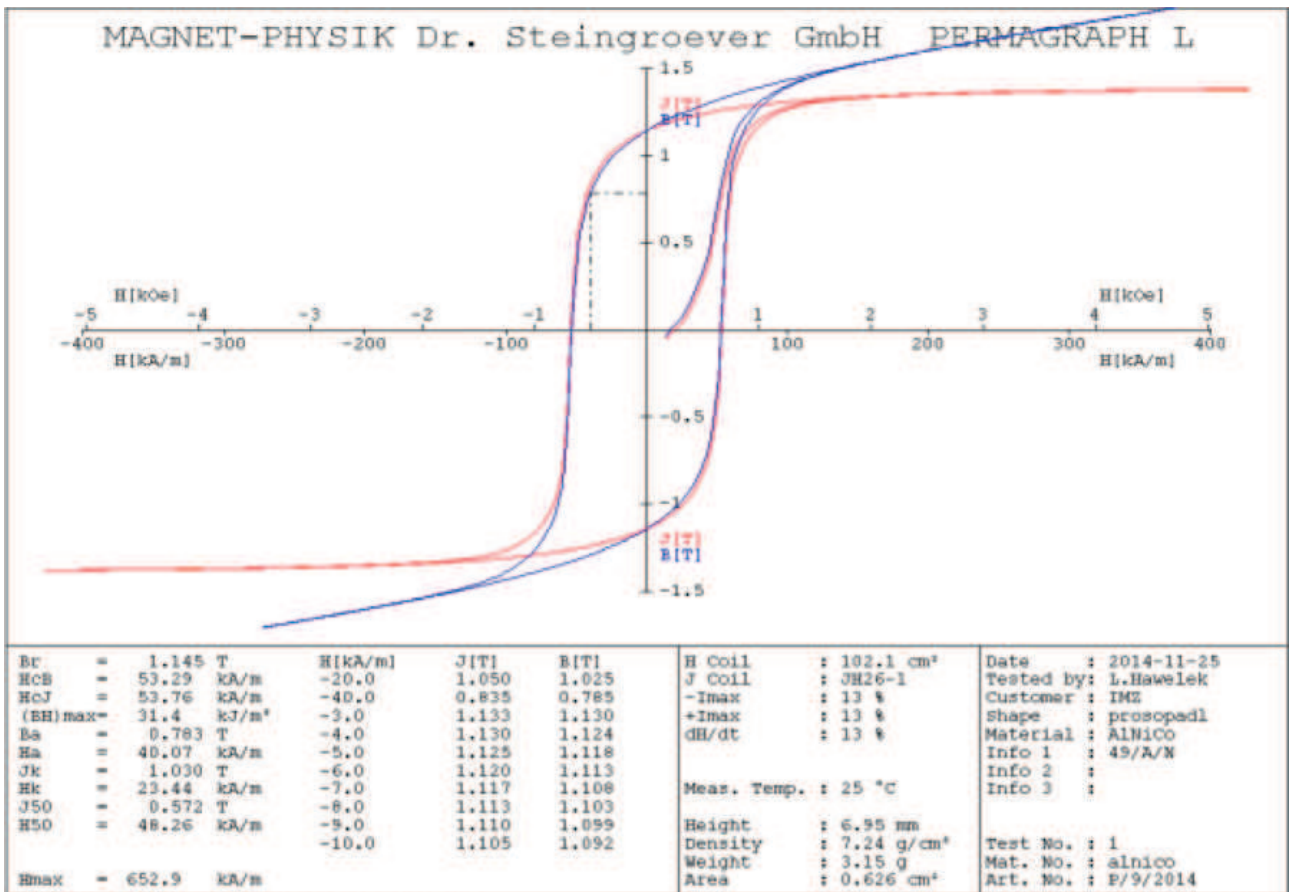
Przykładowe wyniki pomiarów wartości remanencji magnetycznej próbek z pierścienia z wytopu N49 zmierzono wzdłuż osi X i Y przedstawiono na rys. 17.

Przeprowadzono również pomiary domen magnetycznych próbek z wytopów doświadczalnych, które wykazały charakterystyczną dla magnesów trwałych strukturę domenową.

Tabela 2. Zestawienie wyników badań właściwości magnetycznych (remanencji – B_r)

Table 2. Summary of results of magnetic properties investigations (remanence – B_r)

Lp	Oznaczenie próbki	Nr wytopu	Remanencja B_r X (T)	Remanencja B_r Y (T)	Remanencja B_r Z (T)	Orientacja próbki
1	2B6	1471	1,164	0,540	0,373	
2	3A1	1471	1,202	0,436	0,440	
3	2B4	1472	1,129	0,636	0,518	
4	3A1	1472	1,146	0,468	0,445	
5	2B1	1473	1,213	0,669	0,393	
6	4A1	1473	1,163	0,498	0,446	



Rys. 17. Pętla histerezy próbki N z pierścienia N49A: a) pomiar wzdłuż osi X, b) pomiar wzdłuż osi Y

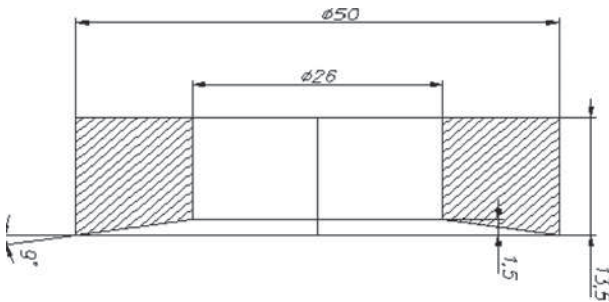
Fig. 17. The hysteresis loop of the sample of the ring N49A: a) measurement along the X axis, b) measurement along the Y axis

Badania chropowatości przeprowadzono za pomocą profilometru stacjonarnego Form Talysurf 50. Wyniki badań po wstępnym szlifowaniu powierzchni próbek pokazały, że najlepszą gładkością powierzchni charakteryzują się próbki z odlanych pierścieni, które zawierały dodatek siarki. Wszystkie badane pierścienie charakteryzowały się bardzo niską wysokością nierówności i spełniały wymagania stawiane przez odbiorcę pierścieni. Nie stwierdzono natomiast wpływu zawartości siarki na twardość odlanych pierścieni.

4.6. OPACOWANIE ZMODYFIKOWANEJ GEOMETRII PIERŚCIENI NA MAGNETO-ZWIERCIADEŁA

W trakcie realizacji projektu, w wyniku opracowania zmodyfikowanej technologii, nastąpiła metalurgiczna poprawa jakości odlewów pierścieni, w zakresie struktury i ich czystości metalurgicznej, co upoważniło do przeprowadzenia weryfikacji wymiarowej, a tym samym do modyfikacji geometrii pierścieni magneto-zwierciadeł, zmierzającej do udoskonalenia procedur obróbki mechanicznej, a przede wszystkim skrócenia czasu obróbki.

Model bazowy pierścienia (wersja I), pokazany na rys. 18, posiadał znaczne naddatki do obróbki mechanicznej w stosunku do wyrobu końcowego, wynikające z niedokładności kształtu, porowatości, mikropęknięć itp.



Rys. 18. Model bazowy pierścienia według dotychczasowej technologii (wersja I)

Fig. 18. The base model of the ring of existing technology (version I)

W kolejnych etapach pracy modyfikowano geometrię pierścieni, opracowując wersje o zmniejszonej masie i zmniejszonych wymiarach.

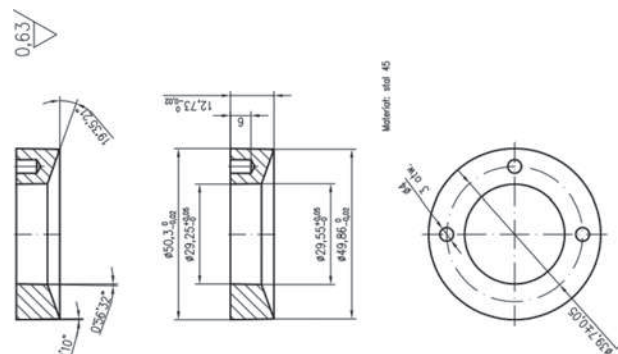
Prace związane z optymalizacją geometrii pierścieni magneto-zwierciadeł wymagały wielokierunkowych działań, obejmujących:

- określenie skurczu odlewniczego pierścieni z wykorzystaniem programu IMatPRO oraz jego weryfikacja o badania fizyczne odlanych półfabrykatów,
- opracowanie wymaganej geometrii modelu pierścienia w zakresie kształtu i wymiarów,
- fizyczne wykonanie odlewów z użyciem opracowanych modeli pierścieni,
- badania sprawdzające geometrię kształtu i wymiarów pierścieni w procedurze technologicznej obróbki skrawaniem metodą szlifowania.

Pierwszym etapem badań była podstawowa zmiana w kształcie (wersja II), która dotyczyła grubości pierścienia oraz naddatków na szlifowanie „zgrubne” otworu i czaszy. Otrzymane wyniki były pozytywne i stanowiły podstawę do dalszych zmian wymiarowych pierścieni.

Kolejna modyfikacja geometrii pierścienia (wersja III), dotyczyła znacznego zmniejszenia jego trzech wymiarów, a mianowicie: grubości, średnicy zewnętrznej i wewnętrznej. Zmiany te spowodowały, że w trakcie obróbki skrawaniem półfabrykatów (pierścieni) magneto-zwierciadeł w MESKO S.A. nie uzyskano właściwego „zabielenia” na grubości i średnicy zewnętrznej pierścienia.

W wyniku zdobytych praktycznych doświadczeń, opracowano kolejną modyfikację geometrii pierścienia w zakresie kształtu i wymiaru, (wersja IV), według której odlewano dalsze partie pierścieni badawczych (Rys. 19). Taka geometria pierścienia o mniejszych wymiarach okazała się optymalna i została wdrożona do produkcji przemysłowej, uzyskując znaczny efekt ekonomiczny z tytułu skróconej obróbki mechanicznej.



Rys. 19. Zmodyfikowana (optymalna) wersja geometrii pierścienia (wersja IV), o zmniejszonych wymiarach w stosunku do wersji I – bazowej

Fig. 19. Modified (optimum) version of the geometry of the ring (version IV), of reduced sizes compared to version I – base

4.7. KONTROLA JAKOŚCI ODLANYCH MAGNETO-ZWIERCIADEŁ NA ETAPIE ICH WYTWARZANIA

Odlane pierścienie magneto-zwierciadeł podlegały kompleksowej procedurze czynności kontrolnych. Kryteriami, które decydowały o ich przydatności do dalszej obróbki półfabrykatów odlanych pierścieni były parametry jakości:

- skład chemiczny stopu,
- uszkodzenia mechaniczne w postaci wykruszeń,
- występowanie porów w materiale pierścienia,
- wartość strumienia magnetycznego.

Kontrolę składu chemicznego wykonano na próbce ciekłego stopu pobranej z pieca przed odlewaniem (tzw. próbka wytopowa), natomiast wstępną kontrolę występowania ewentualnych wad w postaci wykruszeń, porów itp. dokonano metodą wzrokową, bezpośrednio po rozbrojeniu formy.

Wartość strumienia magnetycznego określano po obróbce cieplno-magnetycznej, jako ostatnią czynność kontrolną przed przekazaniem odlewów do dalszej obróbki mechanicznej. Pomiarów strumienia dokonywano za pomocą miliweberomierza typu M-119, który jest urządzeniem analogowym, którego dokładność pomiaru wynosi $\pm 5 \mu\text{Wb}$.

Do dalszej obróbki mechanicznej w MESKO S.A. przekazywano półfabrykaty magneto-zwierciadeł o wartości strumienia magnetycznego powyżej 155 μWb . Wartość ta zapewniała otrzymanie wymaganej

końcowej wartości strumienia magnetycznego określonej przez MESKO S.A., dla gotowego magneto-zwierciadła, po kompleksowej obróbce mechanicznej nie mniejszej niż 122 μWb , a dla odlewu pierścienia – po pierwszym etapie obróbki szlifowania wynoszącej minimum 138 μWb .

5. BADANIA MAGNETO-ZWIERCIADŁ W ZAKRESIE WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH ORAZ WYTRZYMAŁOŚCI MECHANICZNEJ

Badania i próby prowadzone w MESKO S.A miały na celu wytworzenie takiego magneto-zwierciadła, które spełni wszystkie stawiane mu zadania oraz zmniejszy koszt jednostkowy, dla uzyskania efektu ekonomicznego. Zwierciadła wykonane w latach 2008-2012, aż w 42,38% nie spełniały wymagań im stawianych. Większość (35,56%) problemów była związana z właściwościami mechanicznymi, 28,68% sztuk było zdyskwalifikowanych z powodu występowania porów na powierzchni czaszy, a 6,88% przez wykruszenia krawędzi oraz pęknięcia przekrojowe oraz powierzchniowe odlewów na części czaszy. Pozostała część (6,82%) odpadła ze względu na niez uzyskanie wymaganych wartości strumienia magnetycznego.

Opracowane w ramach niniejszego projektu technologie wykonania odlewów o drobnej strukturze ziaren i o rzadko występujących pęknięciach wewnętrznych, pozbawione porów i o niewielkiej ilości wżerów, pozwoliły na zwiększenie uzysku gotowych magneto-zwierciadeł z 57,62% do 79%.

Przeprowadzone badania właściwości magnetycznych pierścieni wykonanych zgodnie z wersją IV odlewów (Rys. 19), pozwoliły na określenie właściwej, minimalnej wartości strumienia magnetycznego dla pierścieni o tak dobranym przekroju (w wersji IV). Ustalono, że dla pomiarów kontrolnych, po pierwszym etapie obróbki mechanicznej (operacji szlifowania) pierścieni na grubość 10,7 mm, wartość strumienia powinna wynosić 136 μWb , natomiast wartość strumienia dla „surowego” odlewu powinna wynosić powyżej 155 μWb .

Różnica ta wynika przede wszystkim z tego, iż pierwszy pomiar dokonywany jest na odlewie „surowym” a drugi pomiar na odlewie przeszlifowanym w dwóch płaszczyznach do wymiaru 10,7 mm. W czasie tej operacji następuje spadek masy oraz zmniejszeniu ulega

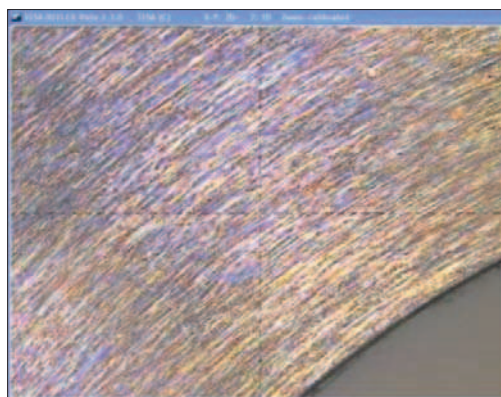
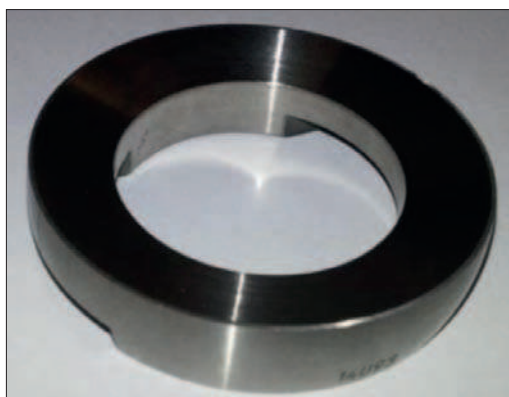
również przekrój poprzeczny pierścienia, od którego uzależniona jest wartość badanego strumienia.

W badaniach właściwości mechanicznych, dla właściwej selekcji wykonanych magneto-zwierciadeł, konieczne było opracowanie kryteriów oceny i określenie metod, za pomocą których należy tej selekcji dokonywać. Kryteria oceny powierzchni zwierciadła określono w następujący sposób:

- stan idealny – całkowity brak porów, wżerów i pęknięć na wszystkich powierzchniach zwierciadła, brak zaciągnięć materiału (smużenia) i uzyskana klasa chropowatości powierzchni o 30% lepsza od wymaganej rysunkiem konstrukcyjnym (Rys. 20);
- stan bardzo dobry – całkowity brak porów i wżerów na wszystkich powierzchniach zwierciadła, brak zaciągnięć materiału (smużenia) i uzyskana klasa chropowatości powierzchni zgodna z wymaganiami rysunku konstrukcyjnego;
- stan dobry – brak porów, wżerów i pęknięć na powierzchni czaszy, możliwe minimalne wżery na pozostałych powierzchniach, przy czym suma tych powierzchni nie przekracza 2 mm^2 , niewielkie zaciągnięcia materiału (smużenia) na powierzchni czaszy i uzyskana klasa chropowatości powierzchni w miejscu jego występowania zgodna z wymaganiami;
- stan zły – występowanie porów, wżerów i pęknięć na powierzchni czaszy, lub wżerów na pozostałych powierzchniach, których suma powierzchni znacząco przekracza 2 mm^2 , zaciągnięcia materiału (smużenia) i uzyskana klasa chropowatości powierzchni niezgodna z wymaganiami rysunku konstrukcyjnego; (wystąpienie któregokolwiek z kryteriów dyskwalifikuje zwierciadło) (Rys. 21).

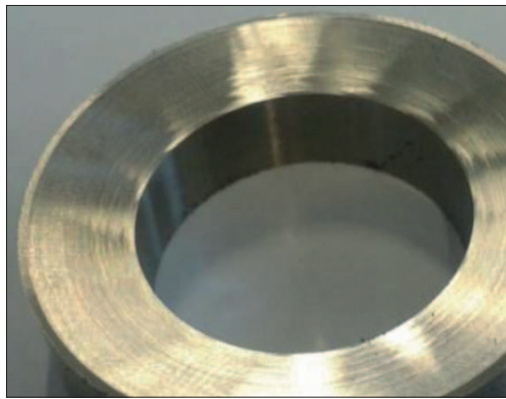
W celu sprawdzenia podatności odlewów na pęknięcia i wykruszenia, przeprowadzono próby na rozrywanie i próby wstrząsowe. Przy sprawdzaniach, w przyjętej do badań temperaturze $+20\pm 22^\circ\text{C}$, nie zostały wykryte żadne dodatkowe uszkodzenia. Podczas prób na rozrywanie, jedynie 2,35% magneto-zwierciadeł nie przeszło badań pomyślnie, tj. pojawiały się pęknięcia.

Drugą próbą było badanie odporności na udary. Magneto-zwierciadła były poddawane udom o wartości 1200 m/s^2 . W żadnym przypadku po jej przeprowadzeniu nie ujawniły się jakiegokolwiek wady. Próby prowadzone w trakcie prac potwierdziły, że zarówno samo sprawdzenie, jak i metodologia są wystarczające i zapewniają bezpieczeństwo wyrobu, w którym stosowane jest magneto-zwierciadło.

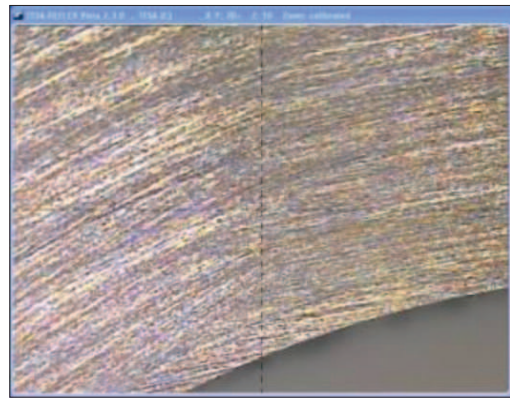


Rys. 20. Przykład magneto-zwierciadła wg pkt. a)

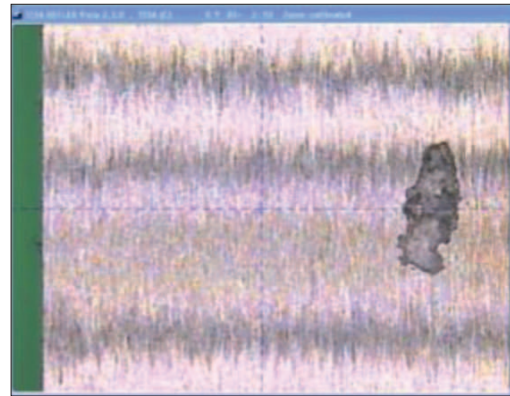
Fig. 20. An example of magneto-mirror according to point a)



Czasza



Średnica zewn.



Rys. 21. Przykład magneto-zwierciadła wg pkt. d)

Fig. 21. An example of magneto-mirror according to point d)

6. OPRACOWANIE UDOSKONALONEJ TECHNOLOGII OBRÓBKI MECHANICZNEJ PIERŚCIENI MAGNETO-ZWIERCIADEŁ

Celem kolejnego zadania realizowanego w MESKO S.A. było opracowanie udoskonalonej technologii obróbki mechanicznej pierścieni magneto-zwierciadeł. Opracowano proces technologiczny wraz z wytypowaniem maszyn do obróbki, takich jak: szlifierka do płaszczyzn, szlifierka kłowa, szlifierka sterowana numerycznie, drążarka elektroerozyjna i narzędzi (w większości standardowych), za pomocą których jest on realizowany. Typując maszyny obróbkowe brano pod uwagę przede wszystkim macierzysty park maszynowy. Zadysonowanie własnych maszyn i obsługujących ich pracowników oraz wykorzystanie w jak największym stopniu narzędzi standardowych pozwoliło ograniczyć generowanie zbędnych kosztów.

Z wykorzystaniem opracowanego procesu technologicznego obróbki skrawaniem wykonano serię prób, których przebieg i uzyskane rezultaty potwierdziły, iż zaproponowane rozwiązania, pozwalają wykonać części zgodnie z rysunkiem konstrukcyjnym. Ponadto analiza metryk pomiarowych magneto-zwierciadeł, wykonanych według opracowanego procesu, pozwoliła na stwierdzenie, że wykonane części są powtarzalne, a jakość w zakresie powtarzalności i klasy chropowatości powierzchni jest bardzo dobra.

Podczas badań udowodniono, że odlewy wykonane z wytopów badawczych posiadają lepsze właściwości mechaniczne, magnetyczne i optyczne niż wykonywane we wcześniejszych latach i pozwalają na zmniejszenie

liczby niespełniających wymagań magneto-zwierciadeł, a co za tym idzie, zmniejszenie kosztów i czasu wykonania giroskopu.

Kolejnym krokiem w realizacji pracy było zaprojektowanie i wykonanie dwóch zespołów stanowisk kontrolno-pomiarowych służących do sprawdzania parametrów magnetycznych i mechanicznych magneto-zwierciadeł. Pierwszy zespół służy do kontroli parametrów w trakcie procesu wytwarzania zwierciadła i składa się z magnesnicy, układu do sprawdzania kierunku tekstury strumienia magnetycznego, układu do określenia chropowatości powierzchni czaszy zwierciadła; ostatni element stanowiska to układ wprowadzający zwierciadło w ruch obrotowy w celu sprawdzenia jego wytrzymałości na rozerwanie.

Drugi zespół ma za zadanie kontrolę właściwości magnetycznych gotowego magneto-zwierciadła, już po zamontowaniu w giroskopie. Składa się on również z magnesnicy oraz układów do pomiaru właściwości magnetycznych i chropowatości powierzchni czaszy zwierciadła. Konieczność budowy dwóch odrębnych stoisk wynika z faktu, że w pierwszym z nich zwierciadło badane jest jako samodzielny element, a w drugim zamontowane jest już w giroskopie. Dlatego też niezbędne było wykonanie specjalnych przyrządów kontrolnych o odmiennej budowie niż w przypadku pierwszego stoiska.

Obydwa stoiska kontrolno-pomiarowe zaprojektowane zostały w taki sposób, aby pomiary można było wykonywać w szybki i nieskomplikowany sposób, a przy tym z możliwie dużą dokładnością. W obu typach stoisk do badania właściwości magnetycznych zastosowano czujnik natężenia pola magnetycznego. W celu przeprowadzenia badania natężenia pola zwierciadło musi

zostać namagnesowane. Służy do tego magnesia będąca częścią stoiska. Jakość powierzchni jest mierzona przez laserowy czujnik odległości, natomiast wytrzymałość zwierciadła na rozzerwanie jest sprawdzana poprzez trzykrotne rozpędzanie go do prędkości 12000 obr./min, w czasie nie dłuższym 2 sekundy.

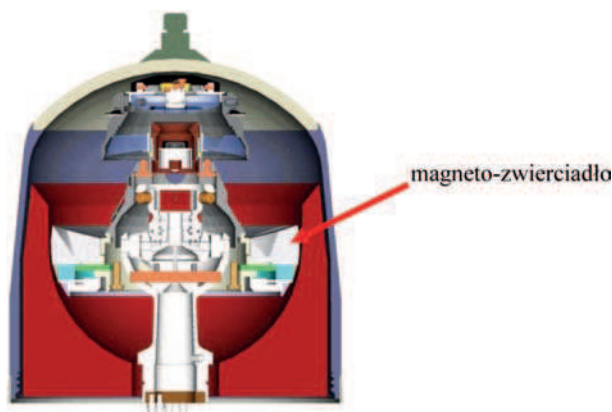
Każde ze zbudowanych stanowisk jest sterowane przez komputer wyposażony w specjalnie do tego celu napisane oprogramowanie oraz karty archiwizacji danych.

Poprzez poprawę jakości odlewów, uzyskano zmniejszenie ilości braków na etapie obróbki ciernej z poziomu 43,56% do poziomu 21%. Osiągnięto również skrócenie czasu wykonania gotowej części. Przed przystąpieniem do realizacji projektu całkowity czas wykonania jednego zwierciadła do stanu „półfabrykatu”, nadającego się do obróbki optycznej wynosił 480 minut. W efekcie prowadzonej pracy, dzięki zmniejszeniu naddatków na obróbkę, unifikacji niektórych czynności obróbkowych i innym działaniom technologicznym czas ten uległ skróceniu do poziomu 343 minut, czyli o 28%. Wynika z tego, że np. w przypadku produkcji 200 sztuk wyrobów zaoszczędzony czas tylko z tytułu skrócenia czasu obróbki wynosi 456 godzin.

Innymi czynnikami, które wpłynęły pozytywnie na aspekt ekonomiczny pracy była unifikacja i prostota zastosowanych rozwiązań, w tym: urządzenia, narzędzia i oprzyrządowania, co przełożyło się pośrednio na koszty zarówno wdrożenia do produkcji jak i samej produkcji.

7. OBRÓBKA OPTYCZNA MAGNETO-ZWIERCIADEŁ WRAZ Z OSTATECZNĄ KONTROLĄ JAKOŚCI

Elementy układu optycznego wraz z korpusem, do którego są przymocowane, tworzą obiektyw OE. Obiektyw zamontowany na przegubie Cardana tworzy giroskop, który w układzie koordynatora wiruje wokół osi układu optycznego z częstotliwością 100Hz (6000 obr./min). Obrót ten umożliwia skanowanie przestrzeni obrazowej układu przez maski detektorów. Magneto-zwierciadło jest jednym z podstawowych elementów układu giroskopowego, a dokładność jego wykonania, jak również jednorodność materiału użytego do jego produkcji ma ogromny wpływ na parametry układu giroskopowego (Rys. 22).



Rys. 22. Magneto-zwierciadło w układzie giroskopu koordynatora

Fig. 22. Magneto-mirror in gyro coordinator system

Ostateczną kontrolę jakości magneto-zwierciadeł przed ich zabudową w obiektywie koordynatora lotu wyrobu specjalnego wykonywano w CRW Telesystem – Mesko, która obejmowała badania sprawdzające jakość oraz właściwości wyrobu w różnych etapach jego wytwarzania. Prowadzona była kontrola mechaniczna oraz pomiary właściwości magnetycznych przed obróbką optyczną magneto-zwierciadła (kwalifikacja międzyoperacyjna przed nałożeniem warstw dielektrycznych). Następnie dokonywana była kontrola mechaniczna, pomiary właściwości magnetycznych i optycznych gotowego wyrobu – magneto-zwierciadła, w zakresie temperatur od -70°C do $+50^{\circ}\text{C}$.

Najważniejsze parametry magneto-zwierciadła to:

- strumień magnetyczny,
- parametry optyczne – klasa czystości powierzchni optycznie czynnej,
- właściwości mechaniczne i dynamiczne.

Na właściwości mechaniczne oraz parametry optyczne magneto-zwierciadła ma wpływ skład chemiczny stopu, jak również technologia wykonania odlewu z tego stopu i dalsza obróbka cieplna i mechaniczna półproduktu. Struktura odlewu powinna być jednorodna i zwarta co ma znaczący wpływ na jakość zwierciadlanej powierzchni optycznej wykonywanej w późniejszym etapie procesu technologicznego przez polerowanie a następnie naparowywanie warstwy aluminium. Zwierciadłana powierzchnia optyczna powinna mieć co najmniej V klasę czystości (wg normy BN-81/5510-01).

Znaczna część magneto-zwierciadeł wytworzona w okresie bazowym, według technologii dotychczasowej nie mogła być użyta do dalszej produkcji ze względu na złą jakość powierzchni optycznej. Zapewnienie V klasy czystości, w tym okresie, nie było możliwe dla prawie 50% magneto-zwierciadeł ze względu na różnego rodzaju wady powierzchni np. wżery i pory, które w zdecydowanej większości są możliwe do wykrycia dopiero po polerowaniu i naniesieniu warstwy odbiciowej. Znaczną poprawę jakości uzyskano dla magneto-zwierciadeł wytworzonych w okresie badawczym, według nowej technologii opracowanej w ramach realizowanego projektu. Średnio, z kilku partii badanych magneto-zwierciadeł, wybrak ten zmniejszył się do 15%. Jakość powierzchni optycznej, a tym samym kształt plamki z układu optycznego był bardzo bliski wartości optymalnej. Przełożyło się to bezpośrednio na kształt impulsu z układu fotodetekcyjnego koordynatora, a właściwości dynamiczne całego układu giroskopowego koordynatora były bardzo dobre.

Badania wartości strumienia magnetycznego, w gotowych magneto-zwierciadłach wykazały, że wartość strumienia magnetycznego jest na dobrym poziomie i spełnia wymagania techniczne dla tego wyrobu. Badaniom poddano gotowe magneto-zwierciadła wykonane z odlewów pierścieni o geometrii dotychczasowej oraz zmodyfikowanej geometrii, o zmniejszonej masie pierścieni i ich wymiarach. Wraz ze zmniejszeniem się masy pierścieni zmniejszeniu uległa powierzchnia przekroju pola magnetycznego, jak również natężenie pola magnetycznego, a tym samym nastąpiło obniżenie wartości strumienia magnetycznego odlewów pierścieni. Jednak pomimo tych zmian, w wyniku poprawy jakości odlewów, w gotowych magneto-zwierciadłach, otrzymano wartości strumienia po obróbce optycznej, na poziomie $128\div 134\ \mu\text{Wb}$, przekraczające wartość wyaganą, określoną na $122\ \mu\text{Wb}$.

Właściwości detekcyjne układów zmieniają się wraz ze zmianą temperatury. Wpływ gradientu temperatury wprowadza odkształcenia magneto-zwierciadła związane z rozszerzalnością termiczną materiału oraz powoduje naprężenia w materiale magneto-zwierciadła, a szczególnie w miejscu jego osadzenia. Wykonane badawcze magneto-zwierciadła odznaczały się bardzo wysoką stabilnością temperaturową parametrów magnetycznych i mechanicznych.

Układy giroskopowe zbudowane w oparciu o badawcze magneto-zwierciadła charakteryzowały się poprawną pracą, zarówno pod względem parametrów optycznych, jak i dynamicznych.

8. PROCEDURY KOMPLEKSOWEJ TECHNOLOGII WYTWARZANIA MAGNETO-ZWIERCIADŁA OBIEKTYWU KOORDYNATORA LOTU WYROBU SPECJALNEGO

Wynikiem realizowanego projektu było opracowanie kompleksowych procedur technologicznych wytwarzania magneto-zwierciadeł o wysokiej jakości, spełniających ostre wymagania ich właściwości użytkowych, w całym cyklu produkcyjnym wyrobu specjalnego (Rys. 23).

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników z badań laboratoryjnych oraz przemysłowych, opracowano procedury technologiczne wytwarzania magneto-zwierciadeł na różnych etapach wytwarzania pierścieni magneto-zwierciadeł, które obejmują:

- technologię wytwarzania półfabrykatów pierścieni-magnesów (w postaci odlewu),
- technologię obróbki cieplno-magnetycznej pierścieni,
- technologię procesu obróbki mechanicznej magneto-zwierciadeł,
- technologię nanoszenia techniką próżniową warstw odbijających i ochronnych na powierzchnię zwierciadła optycznego.

Opracowana kompleksowa technologia wytwarzania magneto-zwierciadeł stosowanych w obiektywie koordynatora lotu rakiety została wdrożona do produkcji magneto-zwierciadeł w MESKO S.A. w Skarżysku Kamienna i w CRW Telesystem – Mesko.

9. PODSUMOWANIE

- Realizacja projektu ukierunkowana była na poprawę jakości pierścieni magneto-zwierciadeł, które stano-

wią podstawowy element inteligentnego obiektywu koordynatora lotu rakiety przeciwlotniczej, poprzez zastosowanie nowych technologii do ich produkcji, aby maksymalnie ograniczyć ich wybrak na poszczególnych etapach wykonania.

- Wyznaczone bardzo wysokie kryteria jakości metalurgicznej magneto-zwierciadła wymusiły wielokierunkowe działania badawcze w obszarze: modyfikacji składu stopu specjalnego, technologii wytapiania i odlewania w próżni, obróbki cieplnej i termomagnetycznej odlewów oraz specjalistycznej obróbki mechanicznej i optycznej.
- W ramach prowadzonych badań, opracowano zmodyfikowaną technologię wytapiania i odlewania stopu AlNiCo400 w próżniowym piecu indukcyjnym typu VIM 30.
- Nowa technologia odlewania stopu z zastosowaniem formy o konstrukcji „monolitycznej” i masy formierskiej z węgla krzemu, pozwoliła na uzyskanie znacznej poprawy jakości odlanych pierścieni, w stosunku do technologii dotychczasowej. Odlewy charakteryzowały się korzystniejszą strukturą oraz mniejszą ilością wad wewnętrznych i zewnętrznych.
- Uzyskana lepsza jakość odlewów pozwoliła na opracowanie zmodyfikowanej geometrii półfabrykatu magneto-zwierciadła, polegającej na zmniejszeniu jego wymiarów oraz masy, a w konsekwencji zmierzającej do zmiany procedur obróbki mechanicznej, przede wszystkim pod kątem skrócenia czasu procesu obróbki i obniżenia kosztów obróbki. Zmiana kształtu i wymiarów odlewu pierścienia nie miała wpływu na morfologię struktury pierścieni.
- Zmiana geometrii pierścienia spowodowała wyznaczenie nowego kryterium w postaci minimalnej wartości strumienia magnetycznego dla nowego odlewu magneto-zwierciadła w wersji IV. Dla zapewnienia wymaganej wartości strumienia magnetycznego gotowego magneto-zwierciadła, określonej na 122 μWb , powinna ona wynosić dla odlanego półfabrykatu pierścienia 155 μWb .
- Przeprowadzone badania właściwości użytkowych doświadczalnych magneto-zwierciadeł na każdym etapie ich obróbki mechanicznej, wykazały znacznie lepszą ich jakość oraz mniejszą ilość wybraków, w stosunku do stanu dotychczasowego, tj. magneto-zwierciadeł wykonanych według dotychczasowej technologii bazowej. Uzyskanie wymaganej V klasy czystości powierzchni optycznej było możliwe w ponad 82% badanych półfabrykatów magneto-zwierciadeł. Należy stwierdzić, że jest to bardzo dobry wynik w stosunku do okresu bazowego, w którym V klasa



Rys. 23. Cykl technologiczny wytwarzania magneto-zwierciadeł

Fig. 23. Technological cycle of production of magneto-mirrors

czystości była uzyskiwana w zaledwie 50% magneto-zwierciadeł.

- W badanych magneto-zwierciadłach uzyskano wartości strumienia magnetycznego po obróbce optycznej wynoszące $128 \div 134 \mu\text{Wb}$, spełniające wymagania techniczne dla tego wyrobu. Wyniki pomiarów świadczą o wysokiej stabilności wartości strumienia zarówno w czasie magazynowania, jak i w wyniku działania podwyższonej temperatury na wyrób.
- Ostateczną oceną przeprowadzonych badań były próby testujące magneto-zwierciadła z prototypowych odlewów wykonanych zgodnie z zaleceniami i wnioskami z poszczególnych etapów realizacji projektu.
- Układy giroskopowe zbudowane w oparciu o badawcze magneto-zwierciadła charakteryzowały się poprawną pracą, zarówno pod względem parametrów optycznych, jak i dynamicznych. Jakość powierzchni optycznej, a tym samym kształt plamki z układu

optycznego był bardzo bliski wartości optymalnej, co przekłada się bezpośrednio na kształt impulsu z układu fotodetekcyjnego koordynatora. Badawcze magneto-zwierciadła odznaczały się również bardzo wysoką stabilnością temperaturową parametrów magnetycznych i mechanicznych.

- Wynikiem wykonanych badań było opracowanie kompleksowych procedur technologicznych wytwarzania magneto-zwierciadeł oraz wytworzenie serii przemysłowej zgodnie z opracowaną technologią. Opracowana technologia została wdrożona do produkcji magneto-zwierciadeł w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach, w MESKO S.A. w Skarżysku Kamienna i w CRW Telesystem – Mesko.

Praca została wykonana w ramach projektu INNOTECH-K2/IN2/42/182371/NCBR/12, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

1. Pogorzałek J., Bulkowski L., Galisz U., Stępień J., Artur M., Różański P., Stecko J.: Opracowanie doświadczalnej technologii wytapiania i odlewania w próżniowym piecu indukcyjnym stopu specjalnego typu AlNiCo o zoptymalizowanym składzie chemicznym oraz wykonanie wytopów badawczych z odlaniem stopu do form o wariantowej konstrukcji, Sprawozdanie IMŻ nr PI-0004-02, grudzień 2014 r., praca niepublikowana oraz Badania wariantowej technologii odlewania pierścieni magneto-zwierciadeł w warunkach półprzemysłowych, pod kątem uzyskania optymalnej struktury pierwotnej i jakości odlanych pierścieni oraz ocena ich czystości metalurgicznej, Sprawozdanie IMŻ nr PI-0004-03, grudzień 2013 r., praca niepublikowana
2. Burian W., Żak A., Bulkowski L.: Symulacja fizyczna i numeryczna procesu odlewania stopów magnetycznych przy zmien-
- nych warunkach krzepnięcia i badanie ich wpływu na właściwości wyrobu końcowego oraz ustalenie parametrów obróbki cieplnej, Sprawozdanie IMŻ nr PI-0004-01, grudzień 2013 r., praca niepublikowana
3. Prześlak R., Stencel M.: Badanie magneto-zwierciadeł w zakresie właściwości magnetycznych i optycznych oraz wytrzymałości mechanicznej, wykonanych według zróżnicowanych technologii oraz Opracowanie specjalnej technologii obróbki mechanicznej i obróbki optycznej pierścieni magneto-zwierciadeł, Sprawozdanie MESKO S.A., nr PI-0004-06 i PI-0004-07, grudzień 2014 r., praca niepublikowana
4. Noga J.: Weryfikacja i bieżące korekty uzyskanych wyników na poszczególnych etapach badań, Sprawozdanie WAT, nr PI-0004-05, grudzień 2014 r., praca niepublikowana