



## Korpusy startowych silników raketowych ze stali „maraging”\*

Jerzy STĘPIEŃ<sup>1</sup>, Jarosław MARCISZ<sup>1</sup>, Bogdan GARBARZ<sup>1</sup>,  
Marek BURDEK<sup>1</sup>, Maciej MOSKALEWICZ<sup>2</sup>,  
Wojciech WÓJTOWICZ<sup>2</sup>, Andrzej PATEK<sup>2</sup>, Jan MATERNIAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instytut Metalurgii Żelaza, ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

<sup>2</sup> Zakłady Metalowe MESKO, ul. Legionów 122, 26-111 Skarżysko-Kamienna

<sup>3</sup> Instytut Technologii Materiałów, Politechnika Poznańska,  
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

**Streszczenie.** Artykuł zawiera wyniki prac zrealizowanych we współpracy Zakładów Metalowych MESKO, Instytutu Metalurgii Żelaza i Politechniki Poznańskiej, dotyczących opracowania i zastosowania nowoczesnych wyrobów stalowych do wytwarzania korpusów raket. Badania przeprowadzono w celu opracowania i wdrożenia technologii wytwarzania korpusów raketowych silników startowych z krążków wyciętych z blachy walcowanej na zimno ze stali „maraging” zamiast ze stali 28H3SNMWFAŻ (SP28Ż). Opracowano skład chemiczny stali „maraging” o symbolu N18K9M5Ts oraz wymagania w zakresie właściwości mechanicznych przed poszczególnymi operacjami technologii wytwarzania korpusów raketowych silników startowych. Wykonano badania podstawowych właściwości fizycznych stali „maraging” N18K9M5Ts wytworzonej w IMŻ w piecu próżniowym VSG 100S, w celu przygotowania bazy danych do projektowania technologii przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Wyznaczono temperatury przemian fazowych, opracowano charakterystyki odkształcalności na zimno oraz ustalono parametry przesycania i utwardzania wydzieleniowego.

**Słowa kluczowe:** inżynieria materiałowa, stal maraging, silnik raketowy, korpus silnika startowego

\* Artykuł był prezentowany na VIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 6-8 października 2010 r.

## 1. WSTĘP

Zastosowanie stali N18K9M5Ts w miejsce stali SP28Ż przez Zakłady Metalowe MESKO S.A. na korpusy startowych silników raketowych w zespole GROM miało na celu uzyskanie lepszych właściwości użytkowych tego zespołu. W korpusie wykonanym ze stali N18K9M5Ts został uzyskany wzrost wytrzymałości większy niż 400 MPa w stosunku do korpusu wykonanego ze stali SP28Ż – wytrzymałość korpusu wzrosła do poziomu powyżej 1950 MPa. W korpusie o wyższych właściwościach wytrzymałościowych można stosować paliwo wyżej energetyczne niż dotychczas stosowane. Umożliwia to uzyskanie większego zasięgu wyrzutu, a także poprawia znacznie żywotność eksploatacyjną korpusu ze stali N18K9M5Ts polegającą na wzroście liczby regeneracji poeksploatacyjnych możliwych do wykonania w stosunku do dotychczas stosowanego. Innym efektem zastosowania stali N18K9M5Ts w miejsce stali SP28Ż jest uzyskanie większej dostępności na rynku półwyrobów przeznaczonych na korpusy. W wyniku realizacji projektu celowego nr 374/BO/B opracowano: założenia technologiczne do wykonania półwyrobów przeznaczonych na korpusy, Tymczasowe Warunki Techniczne na wykonanie stali i półwyrobów, technologię wykonania wytopów próżniowych i półwyrobów przeznaczonych na korpusy, program badań atestacyjnych półwyrobów przeznaczonych na korpusy oraz wykonano badania na materiale wytworzonym metodą wytapiania i odlewania w próżni. Opracowano również założenia do technologii kształtowania stali N18K9M5Ts na gorąco i na zimno na podstawie badań granicznych odkształceń występujących przy tłoczeniu (wytłaczanie, przetłaczanie i wyciąganie). W Zakładach Metalowych MESKO S.A. wykonano partie: modelową, prototypową i próbną, na których przeprowadzono badania atestacyjne i badania typu według opracowanego i zatwierdzonego programu.

Jako bazę podstawową zawierającą dane o strukturze i właściwościach stali maraging N18K9M5Ts, niezbędne do wykonanych analiz, wykorzystano wyniki prac przygotowawczych wykonanych przed ustanowieniem projektu celowego nr 374/BO/B [1, 2].

Według analiz wykonanych w pracach [1] i [2] twardość blach po przesycaaniu mieściła się w zakresie 28÷34 HRC. Zbyt wysoka twardość powoduje zwiększone obciążenie i zużycie narzędzi stosowanych do wytłaczania blach. Na podstawie analizy badań własnych i dostępnych publikacji dotyczących technologii wytwarzania korpusów ze stali typu „maraging” N18K9M5T [3, 4] ustalono, że obniżenie twardości w stanie przesyconym do wartości poniżej 30 HRC, a także podwyższenie właściwości plastycznych i odporności na pęknięcie można uzyskać przez obniżenie zawartości pierwiastków międzywęzłowych (C, N) oraz niektórych pierwiastków metalicznych, takich jak Mn, Cr, Cu oraz Si.

Zaprojektowany gatunek stali „maraging” na korpusy startowe oznaczono jako N18K9M5Ts, gdzie indeks „s” oznacza stal superczystą, czyli o obniżonej zawartości wymienionych powyżej pierwiastków.

## 2. CEL PRACY

Celem projektu było opracowanie i wdrożenie technologii produkcji korpusów startowych silników raketowych ze stali „maraging” typu N18K9M5Ts, która zapewnia wyższe parametry eksploatacyjne i będzie łatwiej dostępna na rynku niż dotychczas stosowana stal SP28Ż (28H3SNMWFĄŻ). Stal SP28Ż jest importowana, a jej skład jest zbliżony do stali narzędziowych do pracy na gorąco. Dla osiągnięcia założonych celów projektu wykorzystano stan wiedzy i posiadane doświadczenie Zakładów Metalowych MESKO S.A., Instytutu Metalurgii Żelaza i Politechniki Poznańskiej.

## 3. OPRACOWANIE CHARAKTERYSTYK MATERIAŁOWYCH I WYKONANIE MATERIAŁÓW WSADOWYCH NA KORPUSY PRZEZNACZONE NA PARTIE MODELOWĄ, PROTOTYPOWĄ I PRÓBNĄ STARTOWYCH SILNIKÓW RAKIETOWYCH DO ZESPOŁU GROM

W celu wykonania korpusów przeznaczonych na partię modelową i prototypową startowych silników raketowych do zestawu GROM wykonano wytopy próżniowe stali N18K9M5Ts w indukcyjnym piecu próżniowym VSG-100, z których wykonano półwyroby w postaci krążków o średnicy 150 mm i o grubości od 3,2 do 4,2 mm. Wytopy na partię modelową odlano do wlewnicy żeliwnej o przekroju prostokątnym 120 x 50 mm i długości 870 mm, a na partię prototypową do wlewnicy o przekroju prostokątnym 60 x 150 mm i długości 800 mm. Przeprowadzona analiza składu chemicznego wytopów badawczych wykazała, że zastosowana technologia wytapiania w próżniowym piecu indukcyjnym obejmująca:

- dobór i przygotowanie wsadu
- ładowanie wsadu do pieca
- topienie wsadu
- odgazowanie i rafinację
- odtlenianie końcowe i regulację składu chemicznego

zapewniła bardzo dobrą trafialność w wymagany skład chemiczny wytwarzanej stali. Uzyskanie niskich zawartości domieszek w stali (P, S, Si, Cu, Mn), a także bardzo niskich zawartości azotu oraz tlenu całkowitego w badanych wytopach, świadczy o dużej czystości wytworzonej stali.

Dla oceny właściwości półwyrobów ze stali N18K9M5Ts przeznaczonych do produkcji partii modelowej korpusów startowych silników raketowych na podstawie TWT, opracowano program badań i przeprowadzono badania atestacyjne na etapie wytwarzania stali, taśm i krążków według tego programu:

- na etapie odlewania przeprowadzono badania składu chemicznego stali N18K9M5Ts
- z każdego wlewka pobrano tarczę do badań makrostruktury na przekroju poprzecznym, ujawnianej w próbie głębokiego trawienia
- na taśmach walcowanych na gorąco przeprowadzono badania właściwości mechanicznych, oceny zawartości wtrąceń niemetalicznych, wielkości ziarna po przesycaaniu i badania ultradźwiękowe,
  - właściwości mechaniczne taśm określono w stanie dostawy (po walcowaniu na gorąco) i po obróbce cieplnej (po przesycaaniu i starzeniu),
  - wielkość ziarna byłego austenitu określono na próbkach po przesycaaniu w temperaturze  $820\pm 10^{\circ}\text{C}$  i w temperaturze  $920\pm 10^{\circ}\text{C}$ ,
  - wszystkie blachy poddano badaniom ultradźwiękowym
- na każdym krążku pochodzącym z danej partii materiałowej przeprowadzono pomiary średnicy i grubości.

Zakres badań atestacyjnych kontrolnych obejmował:

- analizę składu chemicznego blach
- badania makrostruktury blach
- ocenę zanieczyszczenia stali wtrąceniami niemetalicznymi
- ocenę mikrostruktury stali po swobodnym chłodzeniu po walcowaniu
- określenie wielkości ziarna austenitu pierwotnego po przesycaaniu
- właściwości mechaniczne i pomiary twardości taśm po walcowaniu na gorąco i po obróbce cieplnej polegającej na przesycaaniu i starzeniu
- badania ultradźwiękowe.

Odlane wlewki charakteryzowały się dobrą jakością powierzchni bez obecności makrowtrąceń, porów i innych nierówności oraz pęknięć powierzchniowych. Makrostruktura ujawniona w próbie głębokiego trawienia na przekroju poprzecznym wlewków po wyżarzaniu ujednorodniającym była jednorodna. Z badań mikrostruktury wynika, że zabieg ujednorodnienia składu chemicznego wlewków był skuteczny, ponieważ po tej obróbce stwierdzono zanik segregacji międzydendrytycznych. Dodatkowym efektem tej operacji jest rozdrobnienie ziarna austenitu. Po przesycaaniu mikrostruktura badanej stali była martenzytyczna, a wielkość ziarna austenitu po walcowaniu na gorąco zgodnie ze skalą wzorców wg normy PN-84/H-04507 wynosiła 3, natomiast po przesycaaniu z temperatury  $920^{\circ}\text{C}$  wynosiła 7, a z temperatury  $820^{\circ}\text{C}$  wynosiła 8.

W zakresie oceny czystości pod względem zawartości wtrąceń niemetalicznych stwierdzono, że badane próbki z taśm po walcowaniu na gorąco spełniają wymagania.

Taśmy walcowane w zakresie temperatury od 1100 do 900°C, zgodnie z ustaloną technologią, uzyskały wymaganą twardość poniżej 30 HRC. Twardość taśm po przesycaniu i starzeniu wynosiła od 51 do 55 HRC. Właściwości mechaniczne po walcowaniu oraz po obróbce cieplnej były następujące:

- $R_{0,2}$  wynosiła od 757 do 844 MPa po walcowaniu i od 1780 do 2000 MPa po końcowej obróbce cieplnej
- $R_m$  wynosiła od 1008 do 1103 MPa po walcowaniu i od 1959 do 2036 MPa po końcowej obróbce cieplnej
- $A_5$  wynosiła od 12 do 15% po walcowaniu i od 8 do 9% po końcowej obróbce cieplnej.

W trakcie badań ultradźwiękowych nie stwierdzono rozwarstwień, pęknięć, ani dużych skupisk wtrąceń niemetalicznych i innych wad wewnętrznych materiału. Po badaniach ultradźwiękowych odcinki taśm zostały przekazane do ZM MESKO.

Na podstawie badań partii modelowej i prototypowej startowych silników raketowych zespołu GROM przeprowadzono ostateczną weryfikację procesu technologicznego wykonania wytopów próżniowych ze stali „maraging” N18K9M5Ts i półwyrobów przeznaczonych na korpusy oraz weryfikację Tymczasowych Warunków Technicznych na wykonanie stali i półwyrobów przeznaczonych na korpusy startowych silników raketowych. Weryfikacja opracowanej technologii polegała na analizie poszczególnych operacji z punktu widzenia uzyskanych właściwości i parametrów jakościowych stali i półwyrobów w porównaniu z właściwościami wymaganymi na poszczególnych etapach procesu. W wyniku weryfikacji technologii wytapiania stali N18K9M5Ts wprowadzono zmiany polegające na zastosowaniu nadstawki do wlewnicy o przekroju poprzecznym 60 x 150 mm i długości 800 mm.

W wyniku weryfikacji technologii wytwarzania półwyrobów na korpusy startowe stali N18K9M5Ts wprowadzono zmiany polegające na:

- wydłużeniu czasu obróbki cieplnej ujednorodniania wlewków z 9 do 12 godzin
- wprowadzeniu zabiegu skórowania wlewków po obróbce cieplnej ujednorodniania;
- walcowaniu wlewków na taśmy po jednokrotnym nagraniu do walcowania, zamiast walcowania z dwukrotnym nagraniem.

Badania atestacyjne kontrolne wykonano zgodnie z przyjętym programem, który obejmował:

- badania składu chemicznego
- ocenę jakości powierzchni i makrostruktury przekroju poprzecznego wlewków

- ocenę jakości brzegów i powierzchni pasów taśm po piaskowaniu
- ocenę zanieczyszczenia stali wtrąceniami niemetalicznymi
- ocenę mikrostruktury stali po walcowaniu na gorąco
- określenie wielkości ziarna austenitu pierwotnego po przesycaniu
- wyznaczenie właściwości mechanicznych i pomiary twardości taśm po walcowaniu na gorąco i po obróbce cieplnej polegającej na przesycaniu i starzeniu
- badania ultradźwiękowe.

Wyniki przeprowadzonych badań atestacyjnych na stali i półwyrobach wskazują, że wlewki i taśmy wykonane ze stali N18K9M5Ts spełniają kryteria przyjęte w zweryfikowanych Tymczasowych Warunkach Technicznych na wykonanie stali N18K9M5Ts i półwyrobów przeznaczonych na korpusy startowych silników raketowych – TWT-09-2/IMŻ/09. Wytworzony materiał dopuszczono na partię próbną korpusów startowych silników raketowych zespołu GROM.

#### **4. WYKONANIE PARTII MODELOWEJ, PROTOTYPOWEJ I PRÓBNEJ STARTOWYCH SILNIKÓW RAKIETOWYCH DO ZESPOŁU GROM W ZM MESKO S.A.**

W ramach realizacji projektu celowego nr 374/BO/B, ZM MESKO S.A. opracowały następującą dokumentację:

- Wymagania Techniczne dla korpusów startowych silników raketowych wyrobu GROM wykonanych ze stali N18K9M5Ts;
- dokumentację konstrukcyjną do wykonania partii modelowej i prototypowej korpusów startowych silników raketowych wykonanych ze stali N18K9M5Ts;
- program badań zakładowych dla partii modelowej i prototypowej korpusów startowych silników raketowych wykonanych ze stali N18K9M5Ts;
- dokumentację technologiczną do wykonania partii modelowej i prototypowej korpusów startowych silników raketowych wykonanych ze stali N18K9M5Ts;
- dokumentację konstrukcyjną oprzyrządowania do wykonania partii modelowej i prototypowej korpusów startowych silników raketowych wykonanych ze stali N18K9M5Ts.

Na podstawie opracowanych dokumentacji ZM MESKO S.A. wykonały oprzyrządowanie do wykonania partii modelowej i partii prototypowej korpusów startowych silników raketowych ze stali N18K9M5Ts.

ZM MESKO S.A. wykonały partię modelową korpusów startowych silników raketowych ze stali N18K9M5Ts oraz startowe silniki raketowe z korpusami ze stali N18K9M5Ts w ilości 10 sztuk.

Wykonana partia modelowa korpusów startowych oraz silników raketowych z korpusami ze stali N18K9M5Ts spełniła z wynikiem pozytywnym wymagania zakładowe przeprowadzone zgodnie z „Tabelą badań” G 1.4.0.0.010W. Na tej podstawie ZM MESKO S.A. wykonały partię prototypową korpusów startowych silników raketowych ze stali N18K9M5Ts oraz startowe silniki raketowe z korpusami ze stali N18K9M5Ts w ilości 20 sztuk.

Wykonana partia prototypowa korpusów startowych oraz silników raketowych z korpusami ze stali N18K9M5Ts spełniła z wynikiem pozytywnym wymagania zakładowe przeprowadzone zgodnie z Programem Badań Wstępnych (Zakładowych) album nr 0-513/6.

ZM MESKO S.A. opracowały również dokumentację konstrukcyjną i technologiczną do wykonania partii próbnej startowych silników raketowych z korpusami ze stali N18K9M5Ts album nr 0513/8, Warunki Techniczne album nr 0513/7 oraz Program Badań Typu nr 22/PB/R/TK/09. Fotografie przykładowych korpusów silników startowych z partii próbnej zamieszczono na rysunku 1.

Na podstawie opracowanej dokumentacji ZM MESKO S.A. wykonały partię próbną startowych silników raketowych ze stali N18K9M5Ts oraz startowe silniki raketowe z korpusami ze stali N18K9M5Ts w ilości 20 sztuk do Badań Typu.



Rys. 1. Korpus silnika startowego ze stali „maraging” N18K9M5Ts z partii próbnej

Fig. 1. The body of a booster made of „maraging” N18K9M5Ts steel from a test batch

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiono założenia technologiczne do wykonania półwyrobów ze zmodyfikowanego gatunku stali „maraging” N18K9M5Ts przeznaczonych na korpusy startowych silników raketowych zespołu GROM.

Opracowano program badań atestacyjnych półwyrobów przeznaczonych na korpusy oraz wykonano badania na materiale wytworzonym metodą wytapiania i odlewania próżniowego. Na podstawie analizy badań własnych i dostępnych publikacji zaprojektowano skład chemiczny gatunku stali „maraging” na korpusy startowych silników raketowych oznaczonego jako N18K9M5Ts, gdzie indeks „s” oznacza stal superczystą. Opracowano również założenia do technologii kształtowania stali N18K9M5Ts na gorąco i na zimno na podstawie badań granicznych odkształceń występujących przy tłoczeniu (wytłaczanie, przetłaczanie, wyciąganie).

Wytworzony materiał dopuszczono do wykonania partii prototypowej korpusów startowych. Na podstawie analizy prób przemysłowych i badań atestacyjnych sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowana w IMŻ superczysta stal maraging o symbolu N18K9M5Ts, określana również symbolem MS300, wykazuje właściwości kwalifikujące ją do produkcji korpusów startowych silników raketowych w warunkach Zakładów Metalowych MESKO.
2. Po obróbce cieplnej polegającej na przesycaniu i starzeniu korpusy startowe wykonane ze stali N18K9M5Ts spełniają wymagania zawarte w zweryfikowanych Tymczasowych Warunkach Technicznych TWT-09-2/IMŻ/09 na wykonanie stali Ni18K9M5Ts i półwyrobów przeznaczonych na korpusy startowe.
3. Odlewanie i wytapianie w próżni stali N18K9M5Ts oraz wytwarzanie z niej półwyrobów w postaci odcinków taśm o wymiarach 650 x 159-160 x 3,5±0,2 mm należy wykonywać według zweryfikowanych procedur technologicznych, zawartych w sprawozdaniu z projektu celowego nr 374/BO/B.
4. Korpusy startowych silników raketowych wykonane z odcinków taśm o wymiarach 650 x 159-160 x 3,5±0,2 mm według zweryfikowanych procedur technologicznych spełniają kryteria obowiązujące w zweryfikowanych TWT-09-2/IMŻ/09 i mogą stanowić partię prototypową korpusów startowych wytwarzanych ze stali N18K9M5Ts (MS300) metodą przeróbki plastycznej na zimno.

*Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej ze środków na naukę  
w latach 2008-2009 jako projekt celowy nr 374/BO/B.*

## **LITERATURA**

- [1] Stępień J., Burdek M., Garbarz B., Marcisz J., *Zbadanie wybranych właściwości technologicznych decydujących o możliwości zastosowania elementów ze stali do wytwarzania pocisków i rakiet artyleryjskich*, Sprawozdanie z pracy badawczej IMŻ nr S0-0619 (niepublikowane), grudzień 2007 r.



- [2] Stępień J., Burdek M., Garbarz B., Marcisz J., *Wykonanie badań w celu określenia możliwości zastosowania stali „maraging” na korpusy raketowych silników startowych oraz możliwości wykonania korpusów raketowych silników marszowych z pręta ze stali „maraging”*, Sprawozdanie z pracy badawczej IMŻ nr B0-1222 (niepublikowane), styczeń 2008 r.
- [3] Lee I.K., Chou C.P., Cheng C.M., Kuo I.C., Effect of heat treatment on microstructures of flow formed C-250 maraging steel, *Materials Science and Technology*, t. 19, p. 1595, 2003.
- [4] Lee Y.J., Kung M.C., Lee I.K., Chou C.P., Effect of lath microstructure on the mechanical properties of flow-formed C-250 maraging steels, *Materials Science and Engineering*, t. 454-455, p. 602, 2007.

## **Bodies of Rato Booster Rockets Made of Maraging Steel**

Jerzy STĘPIEŃ, Jarosław MARCISZ, Bogdan GARBARZ,  
Marek BURDEK, Maciej MOSKALEWICZ,  
Wojciech WÓJTOWICZ, Andrzej PATEK, Jan MATERNIAK

**Abstract.** The paper presents the results of examinations carried out to determine the possibilities of application of super-clean 300 ksi maraging steel instead of 28H3SNMWF AŽ steel to produce the bodies of RATO booster rockets. The studies of basic physical properties, cold formability, temperatures of phase transformations, and parameters of precipitation hardening of 300 ksi maraging steel were carried out.

**Keywords:** materials engineering, maraging steel, RATO booster rockets