



Korpusy startowych silników raketowych ze stali o podwyższonej wytrzymałości

JERZY STĘPIEŃ, BOGDAN GARBARZ, MAREK BURDEK,
JAROSŁAW MARCISZ, MACIEJ MOSKALEWICZ*,
WOJCIECH WÓJTOWICZ*, JAN MATERNIAK**

Instytut Metalurgii Żelaza, 44-100 Gliwice, ul. Karola Miarki 12-14

*Zakłady Metalowe „MESKO”, 26-111 Skarżysko Kamienna, ul. Legionów 122

**Politechnika Poznańska, 60 965 Poznań, ul. Piotrowo 3

Streszczenie. Artykuł zawiera wyniki pracy zrealizowanej we współpracy Zakładów Metalowych „MESKO” i Instytutu Metalurgii Żelaza, dotyczącej opracowania i zastosowania nowoczesnych wyrobów stalowych do wytwarzania łusek amunicji i korpusów raket. W zakresie badań odkształcania na zimno współpracowano z Politechniką Poznańską. Badania przeprowadzono w celu określenia możliwości wykonania korpusów raketowych silników startowych z krążków wyciętych z blachy ze stali „maraging” zamiast ze stali 28H3SNMWF AŻ (SP28Ż). Opracowano wytyczne dotyczące składu chemicznego i wymaganych właściwości mechanicznych przed poszczególnymi operacjami technologicznymi stali „maraging” typu 250 (N18K9M5T) na korpusy silników raketowych startowych. Wykonano badania podstawowych właściwości fizycznych stali „maraging” MS250 (N18K9M5T) wytworzonej w IMŻ, w celu przygotowania bazy danych do projektowania technologii przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej tych stali. Materiał do badań wytworzono w postaci wlewków odlanych z wytopów wykonanych w IMŻ w piecu próżniowym VSG 100S o masie wytopu 100 kg. Wyznaczono temperatury przemian fazowych, opracowano charakterystyki odkształcalności na zimno oraz ustalono parametry przesycania i utwardzania wydzieleniowego.

Słowa kluczowe: odlewanie stali w próżni, korpus silnika raketowego, właściwości wytrzymałościowe
Symbole UKD: 669.14

1. Wstęp

Artykuł zawiera wyniki pracy zrealizowanej we współpracy Zakładów Metalowych „MESKO” i Instytutu Metalurgii Żelaza, dotyczącej opracowania i zastosowa-

nia nowoczesnych wyrobów stalowych do wytwarzania łusek amunicji i korpusów rakiet. W zakresie badań odkształcania na zimno współpracowano z Politechniką Poznańską. Badania przeprowadzono w celu określenia możliwości wykonania korpusów rakietowych silników startowych z krążków wyciętych z blachy ze stali „maraging” zamiast z dotychczas stosowanej stali 28H3SNMWFAŻ (SP28Ż).

Przedmiotem pracy było m.in.:

- opracowanie wytycznych dotyczących składu chemicznego i właściwości mechanicznych w stanie zmiękczonej stali „maraging” typu MS250 wytapianych i odlewanych w próżni,
- wykonanie laboratoryjnych wytopów ze stali MS250,
- wykonanie krążków z blach odwalcowanych na gorąco i na zimno ze stali MS250,
- wyznaczenie krzywych umocnienia ze stali MS250 metodą walcowania na zimno,
- wykonanie narzędzi i prób tłoczenia z wytłaczaniem i prób przetłaczania w warunkach laboratoryjnych i półprzemysłowych.

2. Cel pracy

Celem pracy było opracowanie charakterystyk materiałowych stali MS250 na podstawie wyników badań i prób laboratoryjnych oraz półprzemysłowych, stanowiących podstawę do planowanego opracowania i wdrożenia technologii przemysłowej produkcji korpusów startowych silników rakietowych ze stali typu „maraging 250” metodą zgniatania na zimno.

3. Wytyczne dotyczące składu chemicznego i właściwości mechanicznych w stanie zmiękczonej stali na korpusy silników rakietowych

Na korpusy startowych silników rakietowych dotychczas stosowano stale wysokostopowe, np. w gatunku SP28Ż. W związku ze wzrostem wymagań odbiorców rakiet w kierunku wyższych właściwości wytrzymałościowych korpusów w stosunku do dotychczas stosowanych, proponuje się zwiększenie właściwości wytrzymałościowych korpusów silników rakietowych startowych przez zastosowanie stali „maraging” typu MS250 (N18K9M5T). W tabeli 1 przedstawiono wytyczne do składów chemicznych stali na korpusy startowych silników rakietowych.

Wytyczne do właściwości mechanicznych w stanie zmiękczonej proponowanej stali, o wyższych właściwościach wytrzymałościowych niż dotychczas stosowaną stal na korpusy silników rakietowych startowych i marszowych, przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 1

Wytyczne do składu chemicznego stali na korpusy startowych silników raketowych

Lp.	Oznaczenie stali	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Cu	Al met
1	N18K9M5T	max 0,02	max 0,10	max 0,10	max 0,010	max 0,010	max 0, 20	17,5 18,5	8,8 9,5	4,6 5,4	0,5 0,8	max 0, 20	0,08 0,11

Uwaga: Zawartości tlenu i azotu powinny być jak najmniejsze. Dla wytopu próżniowego: $N_{\max} = 0,0030\%$ i $O_{\text{całk max}} = 0,0020\%$

TABELA 2

Wymagane właściwości mechaniczne dla stali na korpusy silników raketowych w stanie zmiękczonej

Gatunek stali	$R_{m \max}$ [MPa]	$A_{5 \min}$ [%]	Twardość HRC _{max}
N18K9M5T	1000	16	26 ^{*)}

^{*)} dopuszcza się wyższą twardość o 3HRC

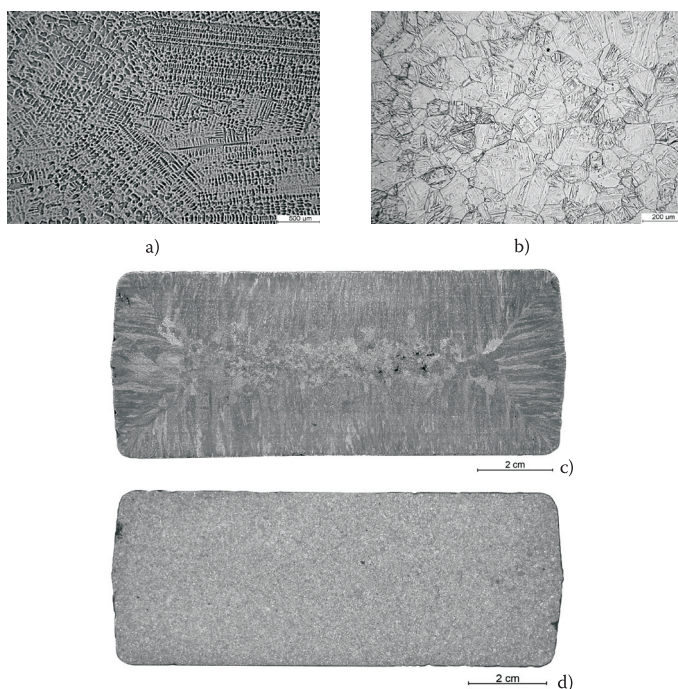
4. Właściwości stali MS250 przeznaczonej na korpusy silników raketowych

Podwyższenie parametrów pracy silników raketowych w systemach obronnych powoduje zwiększanie wymagań co do właściwości wytrzymałościowych materiału przeznaczonego na korpusy silników tych raket. W pracy [1] zaproponowano zastosowanie na korpusy silników raket do systemu obronnego, który był przedmiotem analizy, klas stali o wyższej kategorii wytrzymałościowej od stali stosowanych dotychczas. Na korpusy silników startowych zaproponowano stal „maraging” w gatunku MS250. W pracy [1] opracowano również wytyczne do składu chemicznego. Wytypowany gatunek stali „maraging” należy do gatunków klasycznych, opracowanych w latach sześćdziesiątych XX wieku w USA. Stale te produkowano i badano od połowy lat siedemdziesiątych również w Polsce [np. 2-6], ale obecnie stale „maraging” nie są wytwarzane przez krajowy przemysł.

Celem wykonanych w niniejszej pracy badań stali „maraging” w gatunku MS250 było opracowanie podstawowych charakterystyk materiałowych dla wytopów odlanych w próżniowym piecu indukcyjnym VSG 100S o masie wytopu 100 kg, wymaganych do opracowania wytycznych do technologii wytwarzania korpusów silników raketowych metodą zginiatania obrotowego na zimno oraz pośredniej i finalnej obróbki cieplnej tych korpusów.

4.1. Struktura wlewków ze stali MS250 przed i po wyżarzaniu ujednorodniającym

Wlewki MS250 przed przeróbką plastyczną poddano wyżarzaniu ujednorodniającemu w atmosferze argonu. Stwierdzono, że zabieg ujednorodnienia rozmieszczenia pierwiastków we wlewkach był skuteczny, ponieważ po tej obróbce stwierdzono zanik segregacji międzyczendrytycznych (rys. 1a i b). Dodatkowym efektem tej operacji jest rozdrobnienie ziarna austenitu, co zilustrowano makrofotografiami na rysunkach 1c i d.



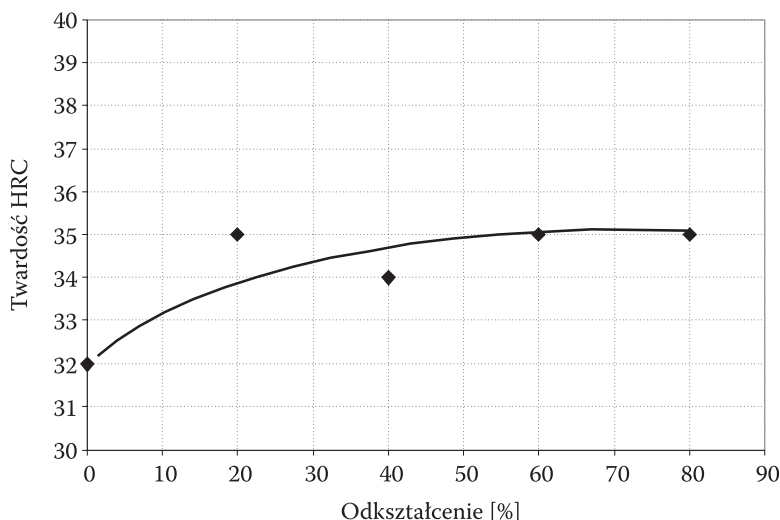
Rys. 1: (a) Dendrytyczna struktura krzepnięcia na przekroju poprzecznym wlewka i (b) mikrostruktura materiału pasma odkutego z wlewka po ujednorodnieniu. Mikrostruktury ujawniono 5% roztworem kwasu azotowego w wodzie. Granice ziaren byłego austenitu na przekrojach poprzecznych wlewka bezpośrednio po zakrzepnięciu (c) i po wyżarzaniu ujednorodniającym (d)

4.2. Umocnienie w wyniku zgniotu na zimno

Wielkość umocnienia w wyniku zgniotu na zimno mierzono wzrostem twardości próbek odkształczanych na zimno przez ściskanie z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej, w odniesieniu do twardości próbek przesycanych w powietrzu. Zaplanowano gnioty 20, 40, 60 i 80%. Gnioty rzeczywiste różniły się nieco od za-

planowanych (ze względu na odkształcenia sprężyste układu narzędzie–próbka). Twardość mierzono na przekroju poprzecznym w środku grubości próbek metodą Rockwella (HRC).

Wyniki pomiarów zamieszczono na wykresie na rysunku 2. Badana stal „maraging” w stanie przesyconym umacnia się na zimno w stosunkowo niewielkim stopniu. Umocnienie w wyniku odkształcenia 80% mierzone przyrostem twardości, wynosi ok. 10%.



Rys. 2. Zmiana twardości próbek ze stali MS250(S8) ściskanych na zimno

4.3. Wyniki próby rozciągania

Badania właściwości mechanicznych stali maraging przeprowadzono na materiale w stanie po przesycaaniu oraz po przesycaaniu i starzeniu. Zakres badań obejmował wyznaczenie $R_{0,2}$, R_m i A_5 w statycznej próbie rozciągania. W próbie rozciągania zastosowano niestandardowe próbki o przekroju prostokątnym. Pomiary twardości wykonano na próbkach przeznaczonych do prób rozciągania w obszarze uchwytu próbki.

Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tabeli 3. Otrzymane wartości $R_{0,2}$ wskazują, że badane stale spełniają wymagania norm w odniesieniu do $R_{0,2}$. Dodatkowo wysokie wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz stosunkowo dobre właściwości plastyczne (A_5) potwierdzają możliwość zastosowania tych stali na elementy pocisków, będących przedmiotem badań niniejszej pracy. Dla porównania w tabeli 3 podano właściwości mechaniczne dla stali SP28Ż.

TABELA 3

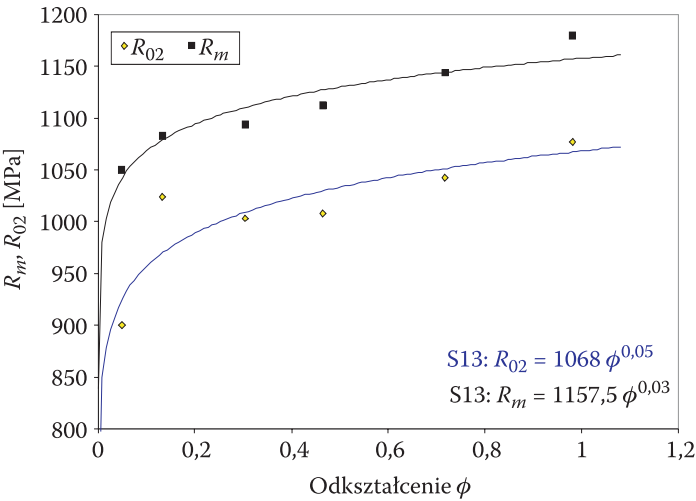
Wyniki właściwości mechanicznych określone w statycznej próbie rozciągania

Gatunek stali	Obróbka cieplna (stan materiału)	$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
MS250 (wytop S8)	Po przesycaniu	772	1075	11,6
		782	1052	15,0
	Po przesycaniu i starzeniu 3 godziny	2059	2114	8,6
		2018	2087	7,6
	Po przesycaniu i starzeniu 9 godzin	2044	2132	7,6
		2061	2136	8,3
		*	2417	*
SP28Ż	Po ulepszaniu cieplnym	1325	1570	7,5

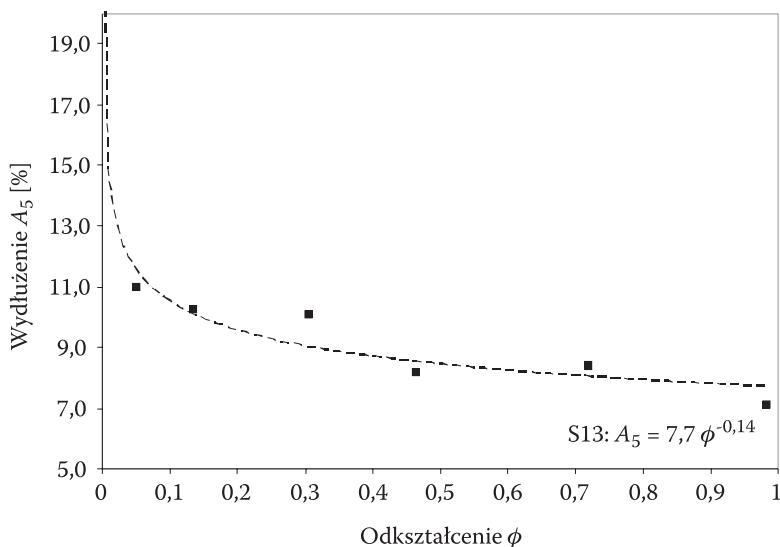
* — brak danych

4.4. Wyznaczenie krzywych umocnienia metodą walcowania na zimno

Jako kryterium oceny podatności stali do odkształcania na zimno przyjęto krzywe umocnienia wyznaczone metodą walcowania próbek w stanie przesyconym (rys. 3 i 4). Na rysunku 3 (R_e i R_m) i 4 (A_5) przedstawiono krzywe umocnienia dla stali MS250.



Rys. 3. Krzywe umocnienia stali „maraging” MS250 (wytop S13). Wytrzymałość R_m i granica plastyczności $R_{0,2}$ w funkcji wielkości odkształcenia na zimno ϕ



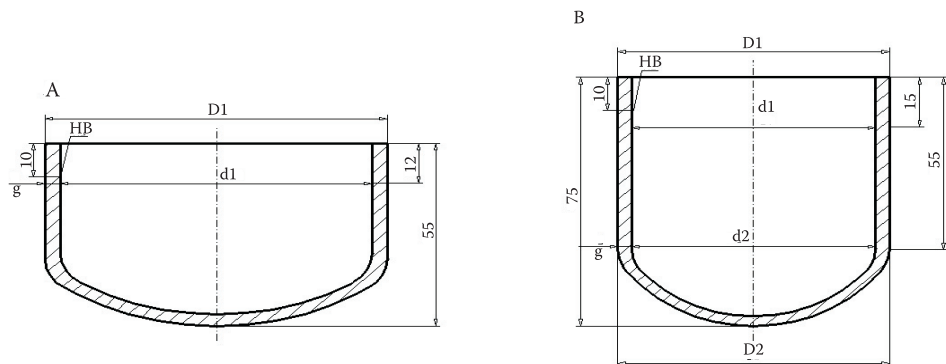
Rys. 4. Krzywe umocnienia stali „maraging” MS250 (wytop S13). Wydłużenie A_5 w funkcji wielkości odkształcenia na zimno ϕ

5. Wykonanie prób tłoczenia i partii wytłoczek korpusów raketowych silników startowych ze stali MS250 w warunkach laboratoryjnych i półprzemysłowych

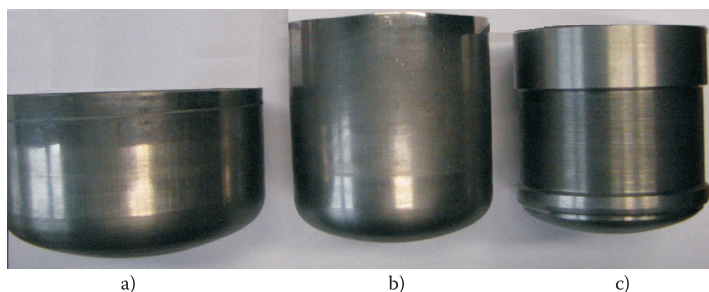
Próby tłoczenia krążków ze stali MS250 o optymalnie dobranych wymiarach wykonano na prasach w warunkach laboratoryjnych Politechniki Poznańskiej, wyposażonych w oprzyrządowanie wykonane do realizacji tych badań. W ramach pracy opracowano konstrukcję i wykonano narzędzia do przeprowadzenia prób tłoczenia z wytłaczaniem i do przetłaczania wyprasek korpusu raketowego silnika startowego ze stali MS250 w dwóch operacjach. Na rysunku 5 przedstawiono zwymiarowany schemat wytłoczek uzyskiwanych po pierwszej operacji tłoczenia z wytłaczaniem (rys. A) i po drugiej operacji przetłaczania (rys. B).

Na rysunku 6 przedstawiono obraz wytłoczek po pierwszej operacji (rys. 6 a), po drugiej operacji (rys. 6 b) odkształcenia i po operacji toczenia (rys. 6 c).

W warunkach technicznych Zakładów Metalowych „MESKO” z dostarczonych krążków o odpowiednio dobranych wymiarach wykonano 23 sztuki korpusów raketowych silników startowych na linii stosowanej do wytwarzania korpusów raketowych silników startowych ze stali SP28Ż. Wszystkie korpusy wykonane ze stali MS250 spełniają wymagania wymiarowe dla korpusów ze stali SP28Ż zawarte w dokumentacji technicznej „MESKO”.



Rys. 5. Schemat wytłoczek po pierwszej operacji tłoczenia z przetłaczaniem (A) i po drugiej operacji przetłaczania (B)



Rys. 6. Widok wytłoczek po pierwszej operacji tłoczenia z wytłaczaniem (a), po drugiej operacji przetłaczania (b) i po operacji toczenia korpusu raketowego silnika startowego ze stali MS250 wykonanego w warunkach laboratoryjnych Politechniki Poznańskiej (c)

6. Podsumowanie

Opracowano wytyczne dotyczące składu chemicznego i wymaganych właściwości mechanicznych przed poszczególnymi operacjami technologicznymi stali „maraging” typu 250 (N18K9M5T) na korpusy silników raketowych startowych.

Wykonano badania podstawowych właściwości fizycznych stali „maraging” MS250 (N18K9M5T) wytworzonej w IMŻ, w celu przygotowania bazy danych do projektowania technologii przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej tych stali. Materiał do badań wytworzono w postaci wlewków odlanych z wytopów wykonanych w IMŻ w piecu próżniowym VSG 100S o masie wytopu 100 kg. Wyznaczono temperatury przemian fazowych, opracowano charakterystyki odkształcalności na zimno oraz ustalono sposób przesycania i utwardzania wydzieleniowego.

W wyniku realizacji niniejszej pracy stwierdzono, że: stal „maraging” MS250 wytapiana próżniowo nadaje się do wytwarzania korpusów raketowych silników

startowych o istotnie wyższej wytrzymałości od materiału stosowanego dotychczas. Technologia przemysłowa zostanie opracowana w wyniku planowanego do realizacji projektu celowego pt.: „Opracowanie i wdrożenie technologii produkcji korpusów startowych silników rakietowych ze stali typu „maraging-250” metodą zgniatania na zimno, którego wniosek został złożony w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. STĘPIEŃ, B. GARBARZ, Sprawozdanie z pracy badawczej IMŻ nr B0-1221/BW, czerwiec 2007.
- [2] Z. BOJARSKI, P. MATYJA, *Hutnik*, 6, 1977, 283.
- [3] Z. BOJARSKI, P. MATYJA, *Archiwum Hutnictwa*, t. 22, z. 3, 1977, 373.
- [4] B. GARBARZ, *Zmiany struktury zachodzące podczas starzenia martenzytycznej stali N18K9M5T*, AGH, Kraków, 1878, praca nieopublikowana.
- [5] B. GARBARZ, S. GORCZYCA, *Archiwum Hutnictwa*, t. 24, z. 4, 1979, 439.
- [6] Norma branżowa BN-83/0631-10, *Stale martenzytyczne umacniane wydzieleniowo wytapiane w próżni*, Gatunki.

J. STĘPIEŃ, B. GARBARZ, M. BURDEK, J. MARCISZ,
M. MOSKALEWICZ, W. WÓJTOWICZ, J. MATERNIAK

Bodies of RATO booster rockets made of higher strength steel

Abstract. The paper presents the results of examinations carried out to determine the possibilities of application of 250 ksi maraging steel instead of 28H3SNMWFAŻ steel to produce the bodies of RATO booster rockets. The studies of basic physical properties, cold formability, temperatures of phase transformations and the mode of precipitation hardening of 250 ksi maraging steel were carried out. As a result of the work it was found that the bodies of RATO booster rockets could be manufactured out from MS250 steel having higher mechanical properties than currently used material. Instructions for the chemical composition and required mechanical properties of steel before each technological operation of the bodies forming were worked out. Production technology of the bodies will be determined in a research work which is planned to be done this year.

Keywords: vacuum casting, rocket engine body, strength properties

Universal Decimal Classification: 669.14

