



WPLYW PARAMETRÓW WYTWARZANIA NA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE KORPUSÓW SILNIKÓW RAKIETOWYCH KALIBRU 227 MM

THE INFLUENCE OF MANUFACTURING PARAMETERS ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF 227 MM ROCKET ENGINE BODIES

Marek BURDEK, Jarosław MARCISZ, Jerzy STĘPIEŃ
Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica
LUKASIEWICZ Research Network, The Institute of Iron Metallurgy, named after Stanislaw Staszic

Ewelina SKOWRON, Józef KRÓL
MESKO S.A

Author's e-mail address: Marek.Burdek @imz.pl; ORCID: 0000-0002-2556-6460

DOI 10.5604/01.3001.0014.0872

Streszczenie: W pracy przeprowadzono badania procesu wytwarzania korpusów kalibru 227 mm ze stali niskowęglowej w gatunku 15HGMVŽ w skali przemysłowej. Określono wpływ parametrów technologii produkcji, takich jak stan materiału przed zgniataniem i wielkość odkształcenia w procesie zgniatania na właściwości mechaniczne korpusu. Wskazano optymalne właściwości materiału po ulepszeniu cieplnym oraz wartości odkształcenia w procesie zgniatania obrotowego dla uzyskania określonych właściwości finalnych korpusów. Wyznaczono rozkład twardości na grubości ścianki korpusu oraz wykonano badania mikrostruktury. Uzyskane wyniki badań wskazują na poprawność procesu wytwarzania korpusów w zakresie doboru parametrów ulepszenia cieplnego i wartości odkształcenia.

Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, korpus, silnik raketowy

1. Wstęp

Celem pracy był dobór parametrów technologii wytwarzania partii badawczej

Abstract: The paper presents a process of industrial fabrication of 227 mm calibre frames made of 15HGMVŽ grade low-carbon steel. Influence of production technology parameters such as the state of material before forming and the degree of deformation during the forming on mechanical properties of frames was established. Optimal material properties after thermal improvement, and levels of deformation at a rotary forming process needed for getting the specific characteristics of final frames were indicated. The hardness across the frame wall was identified and the microstructure was studied. Received results of tests indicate on correctness of the frame production process regarding the selection of parameters for thermal improvement and rates of deformation.

Keywords: material technology, frame, rocket engine

1. Introduction

The paper deals with matching technological production parameters of an exper-

korpusów silników rakietowych o średnicy 227 mm metodą zginiatania obrotowego na zimno ze stali 15HGMVŽ (Ž oznacza stal po procesie elektrożużłowego przetapiania).

Materiał do wytwarzania korpusów spełnia wysokie wymagania w zakresie właściwości technologicznych (np. zdolności do odkształcenia plastycznego na zimno) oraz właściwości mechanicznych (użytkowych) uzyskiwanych sumarycznie w wyniku obróbki cieplnej i umocnienia odkształceniowego w procesie zginiatania obrotowego. Zakres pracy obejmował wszystkie etapy procesu wytwarzania od doboru i opracowania charakterystyk materiału, przez technologie wytapiania, odlewania, przetapiania elektrożużłowego i przeróbki plastycznej metodami kucia na gorąco i walcowania rur grubościennych, po finalną obróbkę cieplną uwzględniającą końcowy proces kształtowania korpusu metodą zginiatania obrotowego. Określono wpływ parametrów obróbki cieplnej i wielkości odkształcenia na właściwości korpusu silnika rakietowego kalibru 227 mm.

2. Weryfikacja opracowanych parametrów technologii ulepszania cieplnego

Celem obróbki cieplnej przygotówek do zginiatania obrotowego było uzyskanie właściwości mechanicznych: umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$, wytrzymałości na rozciąganie R_m i wydłużenia A , które zapewnią jednocześnie założone właściwości mechaniczne korpusów oraz odpowiednie właściwości technologiczne dla procesu zginiatania obrotowego. Założono następujące właściwości finalne korpusu: R_m (min.) 1300 MPa oraz wydłużenie całkowite A (min.) 5%, które uzyskuje się w wyniku umocnienia odkształceniowego w trakcie zginiatania obrotowego materiału o ustalonych właściwościach uzyskanych w wyniku ulepszania cieplnego. W ramach pracy wykonano trzy serie obróbki cieplnej w warunkach przemysłowej linii do ulepszania cieplnego. Zakres

perimental lot of 227 mm diameter rocket motors frames fabricated by a rotary cold forming method from steel 15HGMVŽ (Ž is a steel brand after electroslag remelting).

Material for production of the bodies meets high specifications for technological properties (e.g. capacities for cold plastic straining) and for mechanical properties (usability) provided in a summarised process of thermal treatment and strain hardening at the rotary cold forming. The work comprised all stages of the fabrication process starting from a selection and elaboration of material characteristics, through the technologies of melting, casting, electroslag remelting, and plastic processing by the methods of hot forging and rolling the thick wall tubes, and ending on the final thermal treatment including the terminal process of shaping the frame by the rotary forming method. The influence of thermal treatment parameters and the rate of straining on the properties of 227 mm rocket motor body was determined.

2. Verification of Used Parameters of Thermal Improvement Technology

Tube blanks for rotary forming were thermally processed to get following mechanical properties: assumed plasticity limit $R_{p0,2}$, tensile strength R_m and elongation A , securing both the assumed mechanical properties of the bodies and suitable technological characteristics for the process of rotary forming. The following final characteristics of the frame were assumed: R_m (min.) 1300 MPa and total elongation A (min.) 5% which can be achieved in the result of strain hardening during the rotary forming of the material with the properties settled by the thermal improvement. In the frame of the work three series of thermal processing were performed in conditions of an industrial line for thermal treatment. The work comprised identification of testing pa-

prac obejmował ustalenie parametrów testowych obróbki cieplnej i badania kontrolne na próbkach „świadek” oraz na próbkach z korpusów eksperymentalnych. Badania obejmowały pomiary właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania (próbki o wymiarach $\phi 10/M16 \times 110\text{mm}$), pomiary twardości i obserwacje mikrostruktury oraz ocenę jakości powierzchni. Pierwszą serię obróbki cieplnej przygotówek testowych wykonano na czterech tulejach.

Ustalono i zastosowano następujące parametry linii do ulepszenia cieplnego:

- temperatura austenitizowania: 970°C ,
- hartowanie w oleju,
- zakres temperatury odpuszczania: $640^\circ\text{C} - 660^\circ\text{C}$.

Fotografie tulei testowych podczas obróbki cieplnej zamieszczono na rysunku 1.

rameters of thermal treatment, and the checking tests made on the “witness” samples and on the samples from the experimental bodies. The tests included the measurements of mechanical characteristics at a static tension trial (samples with size $\phi 10/M16 \times 110\text{mm}$), the measurements of hardness and observation of microstructure, and evaluation of surface quality. The first series of thermal processing for testing blanks was performed for four sleeves.

Following parameters were used for the line of thermal improvement:

- Temperature of austenitizing: 970°C ,
- Oil quenching,
- Range of tempering temperatures: $640^\circ\text{C} - 660^\circ\text{C}$.

Pictures of tested sleeves during the thermal treatment are shown in Fig. 1.



Rys. 1. Fotografie tulei testowych podczas ulepszenia cieplnego

Fig. 1. Pictures of tested sleeves during thermal improvement

W tabeli 1 zamieszczono wyniki pomiarów właściwości mechanicznych próbek „świadka” i tulei testowych. Uzyskano zbliżone wartości umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$, wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz wydłużenia procentowego A , całkowitego wydłużenia procentowego przy największej sile A_{gt} i przewężenia procentowego Z dla danej temperatury odpuszczania, co świadczy o równomierności parametrów ob-

Table 1 shows results of measurements for mechanical characteristics of “witness” and tested samples of sleeves. Comparable values were received for the assumed plasticity limit $R_{p0,2}$, the tensile strength R_m and the percentage of elongation A , the percentage of total elongation for the greatest force A_{gt} , and the percentage of narrowing Z for given temperature of tempering, what indicates that parameters of thermal treat-

róbki cieplnej stosowanych w warunkach przemysłowych (temperatura, intensywność chłodzenia) w objętości materiału.

ment used at industrial conditions (temperature, intensity of cooling) are uniformly distributed in the volume of the material.

Tabela 1. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania (PN-ISO 6892-1: 2016)

Table 1. Results of mechanical properties measurements at static tensile test (PN-ISO 6892-1: 2016)

(a) Próbki wytrzymałościowe „świadek” / Strength „witness” samples

Temperatura odpuszczania Tempering temp. [°C]	Nr tulei/ próbki # of sleeve/ sample	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	A_{gt} [%]	Z, [%]	$R_{p0,2}/R_m$
640	1/1	1113	1181	19,0	5,3	69	0,94
640	1/1	1111	1178	16,8	5,2	68	0,94
660	2/1	1053	1109	19,2	5,8	69	0,95

(b) Próbki wykonane z tulei testowych/ Samples taken from tested sleeves

Temperatura odpuszczania Tempering temp. [°C]	Nr tulei/ próbki # of sleeve/ sample	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	A_{gt} [%]	Z, [%]	$R_{p0,2}/R_m$
640	1/1	1129	1204	17,8	5,9	70	0,94
	1/2	1138	1207	18,0	6,0	71	0,94
	2/1	1138	1210	17,8	5,6	67	0,94
	2/2	1133	1212	17,8	6,2	71	0,93
660	3/1	1096	1141	17,2	5,4	71	0,96
	3/2	1094	1139	18,4	6,0	70	0,96
	4/1	1090	1141	16,8	5,3	70	0,96
	4/2	1090	1146	18,6	5,8	72	0,95

Badane tuleje dla zastosowanego zakresu temperatury odpuszczania 640÷660°C charakteryzowała zbliżona wartość wydłużenia ok. 17÷18%. Zmiana temperatury odpuszczania wyraźnie wpłynęła na granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie. Uzyskano R_m w zakresie 1204÷1212 MPa i 1139÷1146 MPa oraz $R_{p0,2}$ 1129÷1138 MPa i 1090÷1096 MPa odpowiednio dla temperatury odpuszczania 640°C i 660°C.

W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów twardości metodą Brinella HBW wykonane na zgładach wzdłużnych próbek pobranych z testowych tulei po ulepszeniu ciepl-

Tested sleeves were characterised by a similar elongation ca. 17÷18% for range of used tempering temperatures 640÷660°C. The change of tempering temperature apparently affected the plasticity limit and the tensile strength. The value for R_m was in the range 1204÷1212 MP and 1139÷1146 MPa, and for $R_{p0,2}$ it was 1129÷1138 MPa and 1090÷1096 MPa respectively to tempering temperatures 640°C and 660°C.

Table 2 presents results of the hardness measurements by Brinell's method made on the alongwise planned samples taken from the tested sleeves after the thermal improve-

nym. Uzyskano wartości twardości w zakresie 378÷383 HBW oraz 347÷352 HBW odpowiednio dla temperatury odpuszczania 640°C i 660°C.

ment. The values of hardness were received on the range of 378÷383 HBW and 347÷352 HBW respectively for tempering temperature 640°C and 660°C.

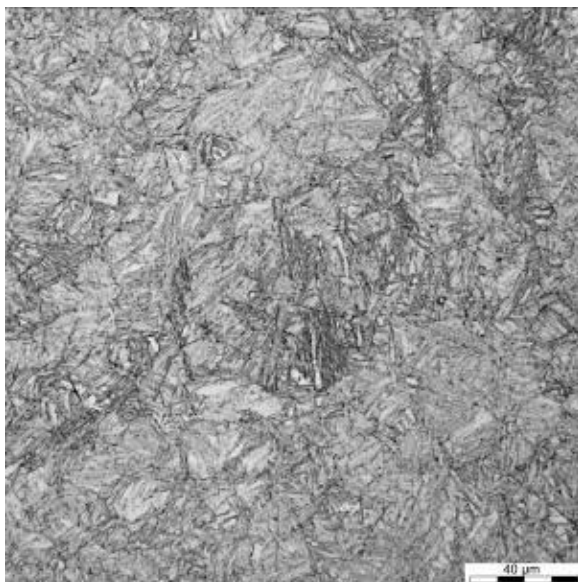
Temperatura odpuszczania <i>Tempering temp</i> [°C]	Twardość HBW <i>Hardness</i>			Wartość średnia <i>Mean value</i>
	380	383	383	
640	380	378	380	381
	380	378	380	
660	347	352	352	351
	352	350	352	

Tabela 2. Wyniki pomiarów twardości HBW 10/3000 (PN-EN ISO 6506-01)

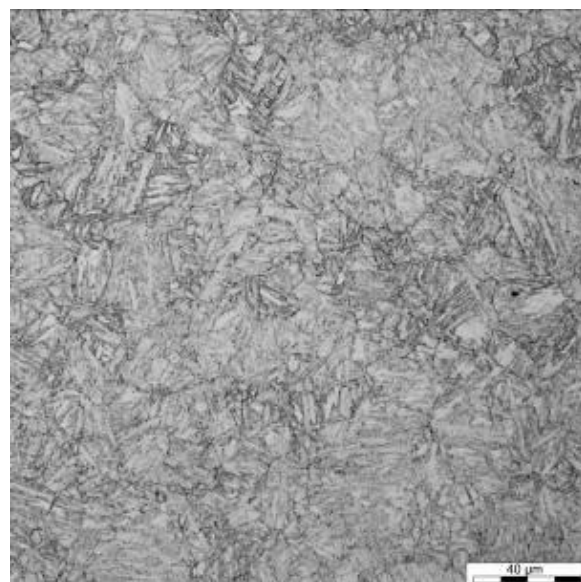
Table 2. Results of measurements for hardness HBW 10/3000 (PN-EN ISO 6506-01)

Wyniki badań mikrostruktury materiału po ulepszeniu cieplnym zamieszczono na rysunku 2. Mikrostrukturę po ulepszeniu stanowił bainit dolny. Nie stwierdzono obecności wydzielań węglików, w szczególności pierwotnych, przy zastosowanych powiększeniach do ok. 1000 x. Brak wydzielań węglików pierwotnych świadczy o prawidłowych parametrach austenitizowania (temperatura i czas procesu).

Results of material microstructure investigations after the thermal improvement are shown in Fig. 2. After the improvement the microstructure contained the bottom bainite. No presence of carbides, especially the primary ones, was noticed for the magnifying power up to ca. 1000 x. The missing of primary carbides proves the appropriateness of austenitizing parameters (temperature and time of processing).



a)



b)

Rys. 2. Mikrostruktura tulei testowych do zgniatania obrotowego w środku grubości ścianki tulei. Temperatura odpuszczania a) 640°C i b) 660°C

Fig. 2. Microstructure of tested sleeves for rotary forming in the middle of the sleeve wall thickness. Temperature of tempering a) 640°C and b) 660°C

Na podstawie wyników badań pierwszej serii testowych tulei do zgniatania obrotowego korpusów ustalono parametry ulepszenia cieplnego serii drugiej materiału, który był przeznaczony do prób technologicznych zgniatania obrotowego przeciwbieżnego w celu wytworzenia korpusów eksperymentalnych.

3. Parametry obróbki cieplnej tulei do wytwarzania korpusów eksperymentalnych

Obróbkę cieplną tulei przeznaczonych do zgniatania obrotowego na zimno przeprowadzono w dwóch partiach. W pierwszej partii wykorzystano 10 tulei ze stali 15HGMVŽ i 2 ze stali 15HGMV. Zastosowano następujące parametry obróbki cieplnej:

- temperatura austenizowania: 970°C,
- hartowanie w oleju,
- temperatura odpuszczania: 660°C.

W trakcie obróbki cieplnej tulei zastosowano próbki wytrzymałościowe typu „świadek”, które przymocowano do tulei. W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości mechanicznych próbek „świadek” uzyskane w statycznej próbie rozciągania.

Basing on results of investigations for the first series of tested sleeves designated for rotary forming of the bodies, the parameters of thermal improvement were established for the second series of the material designated to technological trials of the counter rotating forming for fabrication of experimental bodies.

3. Sleeve Thermal Processing Parameters for Fabrication of Experimental Bodies

Thermal treatment of the sleeves designed for the cold rotary forming was executed in two lots. The first lot employed 10 sleeves made of 15HGMVŽ steel and 2 of 15HGMV steel. Following parameters of thermal processing were used:

- Austenitizing temperature: 970°C,
- Oil quenching,
- Temperature of tempering: 660°C.

During the thermal treatment of the sleeves the strength samples of “witness” type were fixed to the sleeves. Table 3 presents the results of measurements of mechanical properties for the “witness” samples received at the static tensile test.

Tabela 3. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania (PN-ISO 6892-1: 2016). Próbkki „świadek”

Table 3. Measurement results of mechanical properties in static tensile trial (PN-ISO 6892-1: 2016). „Witness” samples

Temperatura odpuszczania [°C] / nr próbki Tempering temperature [°C] /# of sample	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	A _{gt} [%]	Z, [%]	R _{p0,2} /R _p
660/1	1019	1077	18,0	5,2	70	0,95
660/2	1018	1077	20,2	5,9	70	0,95
660/3	1035	1095	19,6	5,8	71	0,95
660/4	1030	1089	18,4	5,9	71	0,95

Uzyskano wytrzymałość w zakresie 1077÷1095 MPa i wydłużenie 18÷20%. W odniesieniu do pierwszej serii wytrzymałość była niższa o ok. 30 MPa, a wydłużenie nie-

The received strength was in the range 1077÷1095 MPa and the elongation 18÷20%. Referring to the first series the strength was lower by ca. 30 MPa and the

znacznie wyższe. Przyczyną niższej wytrzymałości i większego wydłużenia było prawdopodobnie zastosowanie dłuższego czasu odpuszczania.

Drugą partię obróbki cieplnej tulei wykonano przy tych samych parametrach jak dla partii pierwszej, z tym, że zastosowano przed odpuszczaniem wstępne nagrzewanie w temperaturze 300°C w celu redukcji naprężeń wewnętrznych. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych przedstawiono w tabeli 4. Uzyskana wytrzymałość 1086 MPa i wydłużenie 18,0÷18,8% były zbliżone do właściwości materiału z pierwszej partii obróbki cieplnej.

elongation was a bit higher. The likely reason of lower strength and higher elongation was the employment of a longer time of tempering.

The second lot of sleeves was made at the same parameters of thermal treatment as for the first lot apart that a preheating at temperature of 300°C was employed before the tempering to reduce the internal stresses. Results of mechanical properties measurements are presented in table 4. The received strength 1086 MPa and elongation of 18.0÷18.8% were similar to the properties of the material from the first lot of thermal processing.

Tabela 4. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania (PN-ISO 6892-1: 2016). Próbki „świadek” z drugiej partii tulei eksperymentalnych

Table 4. Measurement results of mechanical properties for static tensile test (PN-ISO 6892-1: 2016). “Witness” samples from the second lot of experimental sleeves

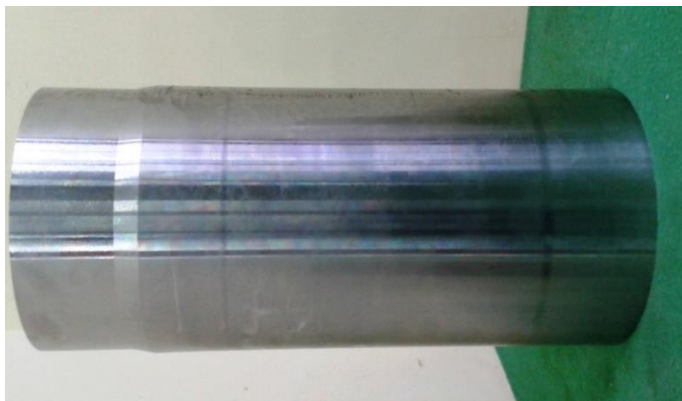
Temperatura odpuszczania [°C] / nr próbki Tempering temperature [°C] / # of sample	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z, [%]	R _{p0,2} /R _m
660/1	1022	1086	18,8	69	0,94
660/2	1024	1086	18,0	69	0,94

4. Zgniatanie obrotowe korpusów silników raket

Do prób przemysłowych przygotowano tuleje z pierwszej serii obróbki cieplnej. Na rys. 3 przedstawiono fotografię przygotówki po obróbce cieplnej i obróbce skrawaniem. Dla jednej z przygotówek po obróbce skrawaniem wykonano kontrolne pomiary twardości na grubości ścianki. Wyniki pomiarów zamieszczono na rys. 4. Twardość mieściła się w zakresie 340-350 HV. Nie stwierdzono spadku twardości przy powierzchni tulei. Zgniatanie obrotowe realizowano na przygotówkach o grubości ścianki 6,2 mm. Próby realizowano z różnym odkształceniem całkowitym, liczonym jako redukcja grubości ścianki, od $\epsilon=1,0$ do $\epsilon=1,6$, które zwiększano w kolejnych próbach.

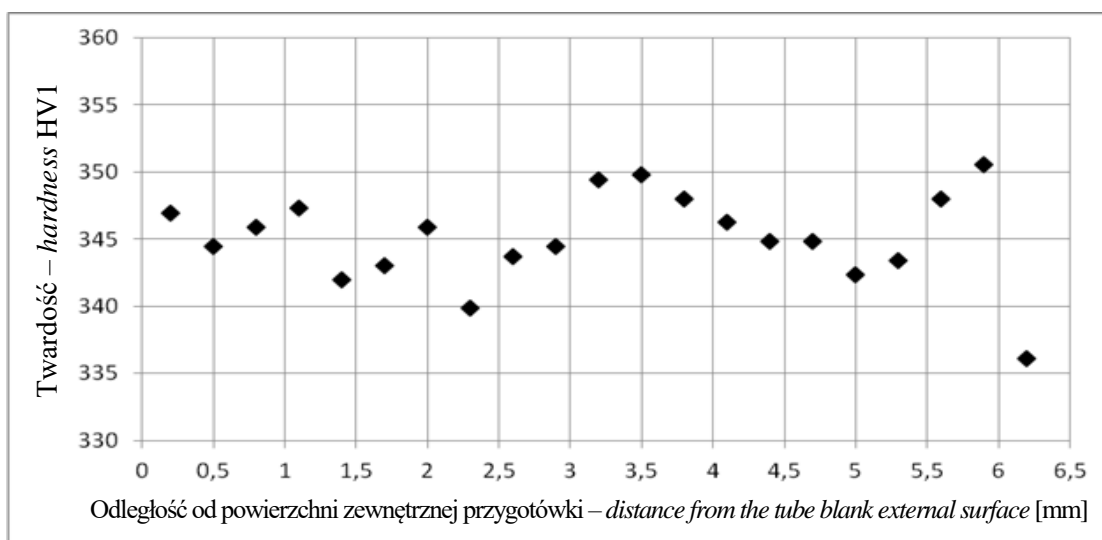
4. Rotary Forming of Rocket Motor Bodies

The sleeves from the first series of thermal treatment were prepared for the industrial trials. Fig. 3 pictures a tube blank after thermal treatment and machining. The checking measurements of the hardness along the wall thickness were made after machining for one of the tube blanks. The measurement results are shown in Fig. 4. The hardness was in the range 340-350 HV. The decrease of hardness at the sleeve surface was not observed. The rotary forming was made for the tube blanks with the wall thickness 6.2 mm. The trials were made for different total deformation, counted as the reduction of wall thickness, from $\epsilon=1.0$ to $\epsilon=1.6$, which were increased for consecutive trials.



Rys. 3. Przygotówka do zgniatania obrotowego

Fig. 3. A tube blank for rotary extrusion



Rys. 4. Wyniki pomiarów twardości na grubości ścianki przygotówki o grubości ścianki 6,2 mm przeznaczonej do zgniatania obrotowego

Fig. 4. Results of hardness measurements on the wall thickness of 6.2 mm for a tube blank designed for rotary forming.

Przeprowadzone testowe zgniatanie obrotowe potwierdziły wysoką zdolność zastosowanego gatunku stali do odkształcenia plastycznego i poprawność doboru parametrów ulepszenia cieplnego. Uzyskano wysoką jakość powierzchni korpusu i równomierną grubość ścianki na długości i na obwodzie wyrobu końcowego.

Do badania właściwości mechanicznych przygotowano próbki z dwóch różnych fragmentów korpusów. Pobrano dwie pary próbek wzdluznych - równoległych do długości korpusu - co 180°. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych korpusów zestawiono w tabeli 5.

The execution of the experimental rotary forming has confirmed the high ability of used steel grade for plastic straining, and the appropriate selection of heat improvement parameters. It provided the high quality of body surface and identical wall thickness across the length and perimeter of the final product.

Two samples were taken from different parts of the body for testing mechanical properties. Two couples of alongside samples, parallel to the body length, were taken by 180°. The measurement results of mechanical properties for the bodies are shown in table 5.

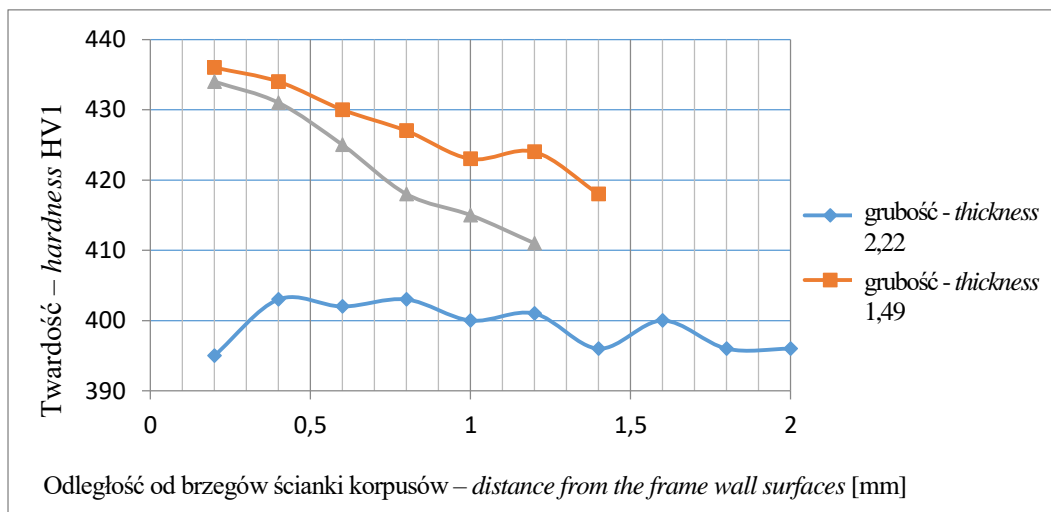
Tabela 5. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych korpusów w statycznej próbie rozciągania (PN-ISO 6892-1: 2016)

Table 5. Measurement results of mechanical properties for the bodies at the static tensile test (PN-ISO 6892-1: 2016)

Oznaczenie korpusu Marking of frame	ε	$R_{p0,2}$	R_m	A_{80}	$R_{p0,2}/R_m$
	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-
K-1,3	1,6	1189	1431	6,5	0,83
K-1,5	1,4	1234	1416	5,9	0,87
K-2,2	1,0	1278	1369	5,4	0,93

Otrzymane właściwości mechaniczne są zgodne z założeniami, tj. $R_m > 1300$ MPa oraz $A_{80} > 5\%$ dla zastosowanych wartości odkształceń całkowitych. Rozrzut wartości sięga kilku procent, co wskazuje na jednorodność odkształcenia na grubości ścianki i poprawność przeprowadzenia procesu ulepszania cieplnego tulei. Zgodnie z przewidywaniami, ze wzrostem odkształcenia wzrasta wartość wytrzymałości oraz nieznacznie spada wydłużenie. Granica plastyczności maleje ze wzrostem wartości odkształcenia w badanym zakresie od $\varepsilon = 1,0$ do $\varepsilon = 1,6$.

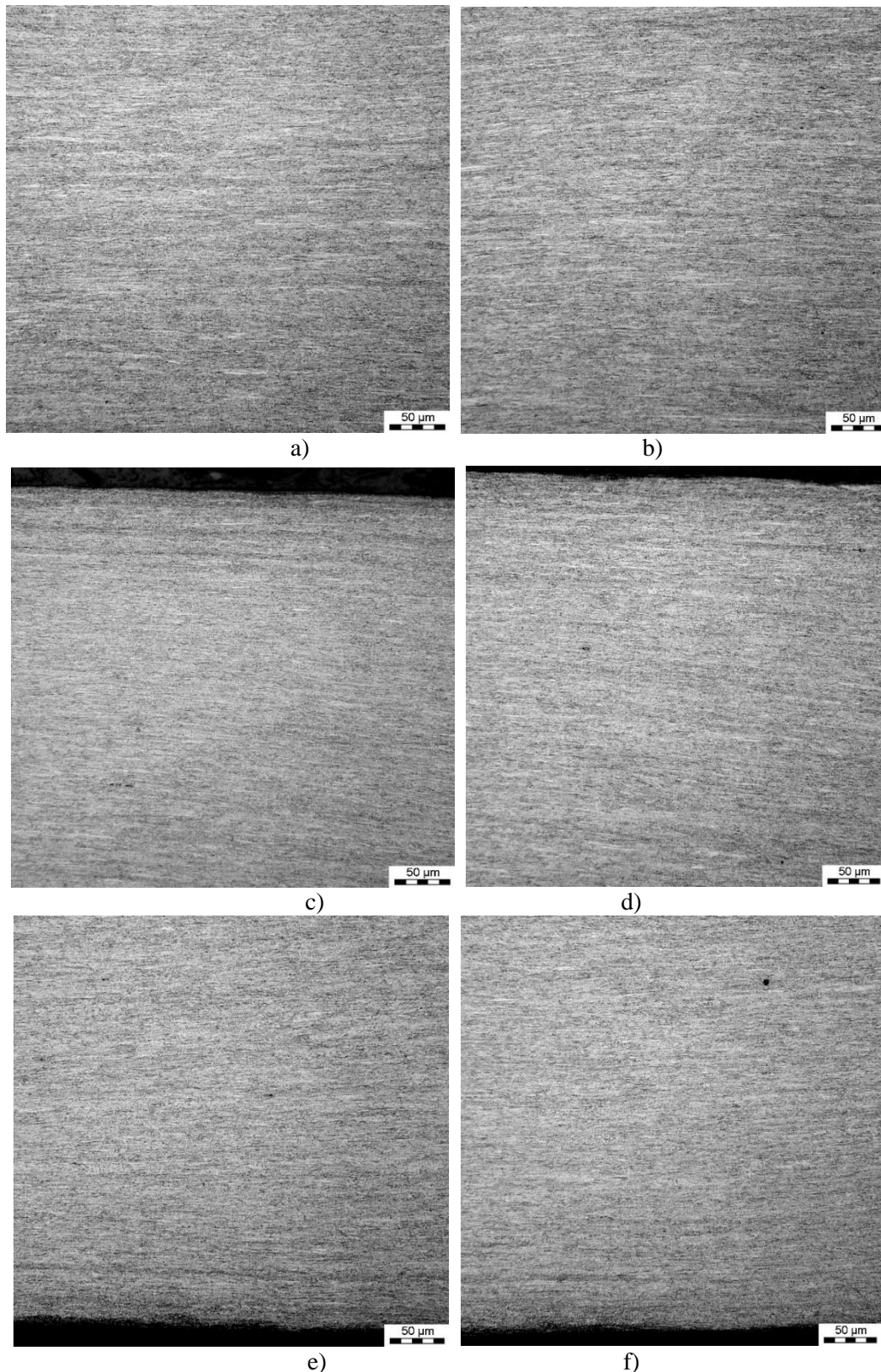
The received mechanical properties comply with the specifications i.e. $R_m > 1300$ MPa and $A_{80} > 5\%$ for applied values of total strains. The dispersion of values is of a few percentage what reflects the uniform deformation across the wall thickness and the proper thermal treatment of the sleeve. According to expectations the increased strain gives the increased strength and an insignificant fall of the elongation. The plasticity limit decreases with the increase of the strain values for the investigated range from $\varepsilon = 1.0$ to $\varepsilon = 1.6$.



Rys. 5. Zmiany twardości na grubości ścianki korpusu po zgniataniu obrotowym
 Fig. 5. Changes of hardness across the body wall thickness after the rotary forming

Pomiary twardości korpusów o grubości ścianki 1,3, 1,5 i 2,2 mm wykonano w miejscach, z których pobrano próbki do badań właściwości mechanicznych.

The hardness of frames at wall thicknesses of 1.3, 1.5, and 2.2 mm was measured in the places where the samples were taken for testing the mechanical properties.



Rys. 6. Mikrostruktura na przekroju wzdłużnym korpusu w środku grubości ścianki 1,3 mm (rysunek 6 a i b), na przekroju wzdłużnym korpusu przy brzegu od strony rolek (rysunek 6 c i d) i od strony trzpienia (rysunek 6 e i f), pow. 693x

Fig. 6. Microstructure on the frame alongside cross-section in the middle of 1.3 mm wall thickness (Fig. 6 a and b), on the frame alongside cross-section at the edge from the roll side (Fig. 6 c and d) and from the side of mandrel (Fig. 6 e and f), magnification - 693x

Średnia twardość HV10 w badanych obszarach wynosiła: 434 dla korpusów o grubości ścianki 1,3 mm, 427 dla korpusów o grubości ścianki 1,5 mm i 404 dla korpusów o grubości ścianki 2,2 mm. Na rys. 5 przedstawiono rozkłady twardości HV1 na grubości ścianki wszystkich badanych korpusów.

W procesie odkształcenia metodą zgniatania obrotowego najwyższa twardość występuje w obszarach zewnętrznych korpusu, tj. od strony rolek zgniatających, w szczególności dla większych wartości odkształceń ($\varepsilon=1,4$ i $\varepsilon=1,6$). Różnica twardości pomiędzy zewnętrzną a wewnętrzną powierzchnią badanego korpusu wynosiła ok. 20÷30 HV. Natomiast w korpusie o wartości odkształcenia $\varepsilon=1,0$ różnice twardości są znacznie mniejsze i wynoszą poniżej 10 HV.

Na rysunkach 6÷8 przedstawiono mikrostrukturę korpusów po zgniataniu obrotowym na zglądach wzdłużnych i poprzecznych. Dla zastosowanych powiększeń w mikroskopie świetlnym zidentyfikowano wydłużone elementy mikrostruktury, stanowiące pakiety listew odpuszczonego bainitu dolnego i martenzytu. Silne rozdrobnienie składników mikrostruktury uniemożliwia szczegółową identyfikację wszystkich faz. Wyniki badań mikrostruktury z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego zamieszczono na rysunkach 7÷8.

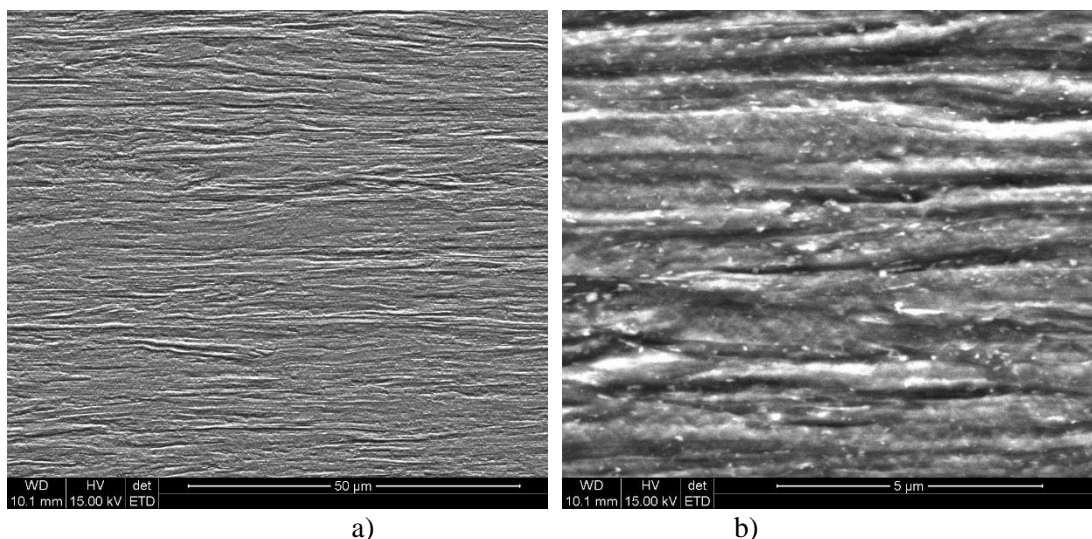
Mikrostrukturę korpusu stanowią silnie wydłużone listwy odpuszczonego bainitu/martenzytu oraz dyspersyjne węgliki. Cząstki wydzielen w zdecydowanej większości o średnicy poniżej 200 nm, są równomiernie rozmieszczone w materiale (rysunki 7b i 8b). Węgliki powstały w wyniku odpuszczania w procesie ulepszania cieplnego tulei. Wytworzony rodzaj mikrostruktury, w szczególności dyspersyjne twarde cząstki, zapewnia jednocześnie wysoką wytrzymałość oraz ciągliwość. Wytrzymałość korpusu jest także wynikiem odkształcenia plastycznego o wartości od $\varepsilon=1,0$ do $\varepsilon=1,6$ zadanego w procesie zgniatania obrotowego.

The average value of HV10 for investigated areas was: 434 for the frames with the wall thickness 1.3 mm, 427 for frames with wall thickness 1.5 mm and 404 for the frames with wall thickness 2.2 mm. Fig. 5 shows distributions of HV1 hardness through the wall thickness for all tested bodies.

During the process of straining by the method of rotary forming the highest hardness is on the external areas of the frame i.e. from the side of forming rolls, especially for greater values of strains ($\varepsilon=1.4$ and $\varepsilon=1.6$). Difference of hardness between the outside and inside surfaces of the investigated frame was ca. 20÷30 HV. And, for the frame with the strain value of $\varepsilon=1.0$ the differences of hardness are significantly lower and are below 10 HV.

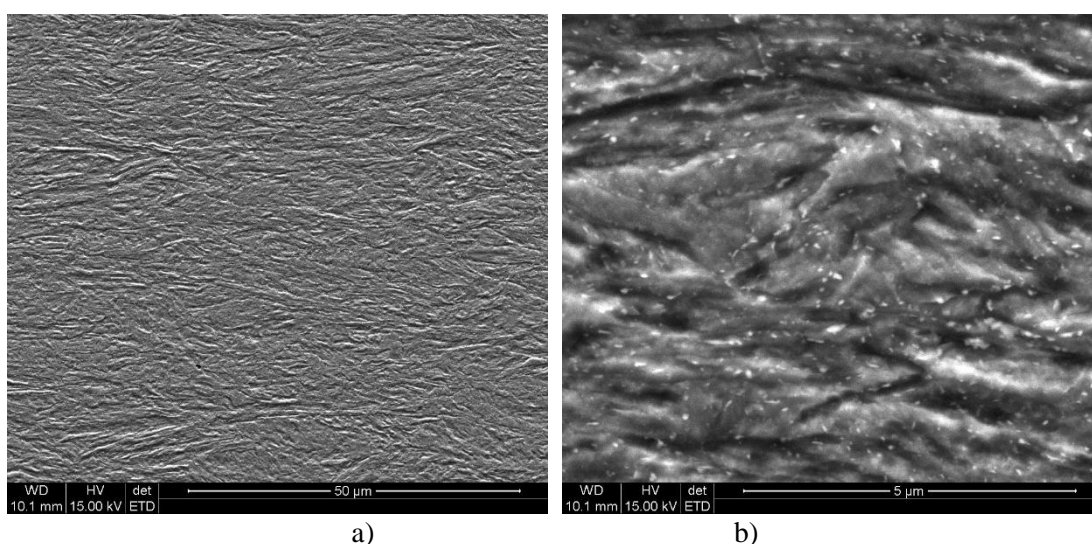
Fig. 6÷8 show the microstructure of the frames after the rotary forming on the along-side and crosswise planned surfaces. For the applied magnifications of the optical microscope there were identified some elongated elements of the microstructure being the clusters of laths of tempered down bainite and martensite. A high level of fragmentation of microstructure components prevents a detailed identification of all phases. The results of microstructure investigations using a scanning electron microscope are shown in Fig. 7÷8.

The microstructure of the frame comprises highly elongated laths of tempered bainite/martensite and dispersive carbides. The particles of formations have mostly the diameter below 200 nm and are distributed uniformly in the material (Fig. 7b and 8b). Carbides were created in effect of tempering during the thermal improvement of the sleeve. The produced type of microstructure, and especially the dispersive hard particles, provides both the high strength and ductility. The strength of the body is also effected by the plastic deformation with the rate from $\varepsilon=1.0$ to $\varepsilon=1.6$ applied at the rotary forming process.



Rys. 7. Mikrostruktura korpusu o grubości ścianki 1,3 mm po zgniataniu obrotowym, przekrój wzdłużny, skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 7. Microstructure of the body with wall thickness of 1.3 mm after the rotary forming, alongside cross-section, scanning electron microscope



Rys. 8. Mikrostruktura korpusu o grubości ścianki 1,3 mm po zgniataniu obrotowym, przekrój poprzeczny, skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 8. Microstructure of the body with wall thickness of 1.3 mm after the rotary forming, crosswise cross-section, scanning electron microscope

5. Wnioski

Eksperymentalna partia korpusów silnika raketowego o średnicy 227 mm przy zastosowaniu redukcji ścianki z 6,2 mm do 1,3-2,2 mm charakteryzuje się właściwościami i mikrostrukturą, które są rezultatem wielu operacji technologicznych, w tym ulepszania cieplnego i zgniatania obrotowego na zimno.

5. Conclusions

The experimental lot of rocket motor frames with diameter of 227 mm, and with the applied reduction of wall from 6.2 mm to 1.3-2.2 mm is characterised by the properties and microstructure effected by many technological operations including the thermal improvement and the cold rotary

W celu uzyskania zakładanych właściwości mechanicznych korpusu należy właściwie dobrać parametry obróbki cieplnej tulei oraz wielkość odkształcenia podczas zgniatania tych tulei. Odkształcenie o wartości $\varepsilon=1,4$ dla końcowej grubości ścianki 1,5 mm i $\varepsilon=1,6$ dla końcowej grubości ścianki 1,3 mm wywołuje nadmierne umocnienie materiału, czyli zbyt wysoką wytrzymałość w stosunku do założonej, natomiast odkształcenie o wartości $\varepsilon=1,0$ dla końcowej grubości ścianki 2,2 mm daje właściwości założone: $R_m=1370$ MPa i wydłużenie A powyżej 5%. Jakość powierzchni korpusów spełnia stawiane im wymagania.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów, można w przybliżeniu oszacować zachowanie materiału docelowego, który będzie zgniatany obrotowo z taką samą wartością odkształcenia, ale z przygotówki o grubości ścianki 10 mm w celu uzyskania korpusu o większej długości. Z dotychczas przeprowadzonych prób zgniatania obrotowego wynika, że w przypadku większej grubości ścianki (np. 8 mm) i przy wartości odkształcenia poniżej 1,40 rozkład twardości na grubości korpusu charakteryzuje się większym zróżnicowaniem. Z tego powodu określona objętość materiału ulega istotnie mniejszemu odkształceniu niż odkształcenie średnie, co może przyczynić się do poprawy jakości wyrobu.

forming. In order to receive the assumed mechanical properties of the frame the parameters of sleeve thermal processing, and the rate of deformation at sleeve forming have to be appropriately matched. The rate of straining $\varepsilon=1.4$ for the final wall thickness 1.5 mm, and $\varepsilon=1.6$ for the final wall thickness 1.3 mm provides an excessive strengthening of the material, and then the strength is a bit higher than assumed, whereas the rate of deformation $\varepsilon=1.0$ for the final wall thickness 2.2 mm secures the assumed characteristics: $R_m=1370$ MPa and elongation A above 5%. The quality of the frame surfaces meets the assumed specifications.

Basing on the performed experiments the estimation may be made over the behaviour of the final material which will be subjected to the rotary forming at the same rate of straining, but from a tube blank with wall thickness 10 mm to get a longer frame. The existing experience on the rotary forming says that for a thicker wall (e.g. 8 mm) and for the straining rate below 1.40 the distribution of hardness through the frame thickness is more differentiated. For this reason a specific volume of the material is subjected to a significantly lower deformation than the average deformation what may contribute to the improvement of the article's quality.

Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez NCBiR w ramach projektu pt. „Silniki pomocnicze na paliwo stałe dla raket nośnych wykorzystujących paliwo ciekłe” realizowanego zgodnie z Umową nr DOB-BIO8/06/01/2016.

The paper contains the results of work financed by the National Centre of Researches and Development in the frame of project „Assisting Solid Propellant Motors for Liquid Propellant Main Rockets” and conducted under the Agreement nr DOB-BIO8/06/01/2016.

