

Mgr inż. Tadeusz DRENGER, mgr inż. Jan WIŚNIEWSKI, doc. dr inż. Jerzy LISOWSKI,  
mgr inż. Tomasz GADEK  
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

# Badania procesu zgniatania obrotowego przyrostowego, wytłoczek z super stopu niklu Inconel 625 i stali nierdzewnej 0H18N9

## *Investigation of the process of incremental flow forming of drawpieces made of Inconel 625 nickel super alloy and 0H18N9 stainless steel*

### **Streszczenie**

W artykule opisano wyniki badań technologii kształtowania obrotowego wyrobów o złożonych kształtach z trudno odkształcalnych i szybko umacniających się materiałów, przeprowadzonych w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. W badaniach określono optymalne parametry procesu zgniatania obrotowego wytłoczek wykonanych ze stopu niklu Inconel 625. Ustalono także najkorzystniejszą geometrię kształtu rolki roboczej, zapewniającą podwyższone dokładności kształtu wyrobu i zawężone tolerancje wykonania.

### **Abstract**

*The paper describes the investigation results of the technology of flow forming of complex shaped products made of hard-to-deform and easily strain hardening materials which investigation has been performed by the Metal Forming Institute in Poznań. Within the investigation, optimum parameters of the process of flow forming of drawpieces made of Inconel 624 nickel alloy have been found. The most advantageous geometry of the working roll has also been determined to ensure higher product shape accuracy and narrower execution tolerances.*

**Słowa kluczowe:** wyoblanie, zgniatanie obrotowe, materiały trudno odkształcalne, kształtowanie przyrostowe

**Key words:** *spinning, flow forming, hard-to-deform materials, incremental forming*

## **1. WSTĘP**

W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu wykonano badania technologii zgniatania obrotowego wyrobów ze stopu niklu Inconel 625 i stali nierdzewnej 0H18N9 oraz badania stali głębokotłocznej DC-04.

Wstępne wyniki badań, przeprowadzone uprzednio [1] potwierdziły możliwości kształtowania metodą zgniatania obrotowego wyrobów walcowych ze stopu niklu i stali nierdzewnej, przy zachowaniu odpowiednich warunków i parametrów technologicznych procesu. Stwierdzono także możliwość opracowywania procesu technologicznego wykonywania

## **1. INTRODUCTION**

*The Metal Forming Institute in Poznań has investigated the technology of flow forming products made of Inconel 625 nickel alloy and of 0H18N9 stainless steel, as well as deep drawing steel, DC-04.*

*The initial results of previously performed investigation [1] have confirmed the possibility of flow forming of cylindrical products of the nickel alloy and stainless steel if adequate conditions and process technological parameters are provided. It has also been found possible to elaborate the technological process of manufacturing products selected*

wytypowanych z przemysłu wyrobów typu długie wyroby walcowe z wydłużoną poboczną i pocienioną ścianką. Wyroby te są stosowane m. in. w zakładach przemysłu lotniczego krajowego i koncernów zagranicznych. Wyniki tych badań zostały opisane w publikacji Obróbka Plastyczna Metali nr 2/2009 [2].

W niniejszym artykule opisane są wyniki późniejszych badań przeprowadzonych w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu w zakresie kształtowania zgniataniem obrotowym wyrobów ze stopu niklu Inconel 625 oraz stali nierdzewnej 0H18N9 [3].

Na podstawie tych wyników przygotowuje się i opracowuje nowe technologie dla wybranych wyrobów z przemysłu.

### 1.1. Materiał wyjściowy do badań

Materiałem wyjściowym do badań były wytłoczki walcowe, ukształtowane z krążków blachy metodą wytłaczania na prasie hydraulicznej. Wstępne wytłoczki walcowe wykonano z trzech gatunków materiałów: stopu niklu (Inconel 625), stali nierdzewnej (0H18N9) i stali głębokotłocznej (DC-04). Wytłoczki te po tłoczeniu nie były obrabiane cieplnie i wyżarzane.

### 1.2. Metodyka badań

Celem badań było określenie możliwości zastosowania procesu przyrostowego kształtowania obrotowego do wykonywania wytłoczek z trudno odkształcalnego i szybko umacniającego się materiału jakim jest m.in. super stop niklu Inconel 625.

W celach porównawczych określono też możliwości kształtowania obrotowego wytłoczek wykonanych ze stali nierdzewnej 0H18N9 oraz stali głębokotłocznej DC-04.

W początkowych badaniach procesu zgniatania obrotowego nie stosowano obróbki cieplnej wyżarzania wytłoczek wyjściowych.

Badania procesu zgniatania obrotowego wydłużającego przeprowadzono w gnieździe badawczym Zakładu Tłoczenia Instytutu Obróbki Plastycznej, na zgniatarce obrotowej MZH-400 wyposażonej w dwie rolki, umieszczone naprzeciw siebie, kontrolowane za pomocą sterownika CNC.

*from industry like long cylindrical products with elongated side and thinned wall. Those products are used by the domestic aerospace industry and by foreign companies. The results of those investigations have been described in the periodical, Metal Forming No.2/2009 [2]*

*The present paper describes the results of later investigation performed in the Metal Forming Institute in Poznań concerning flow forming of Inconel 625 nickel alloy and 0H18N9 stainless steel products [3].*

*Basing on those results, new technologies for selected industrial products are prepared and elaborated.*

### 1.1. Initial material

*The initial material was cylindrical drawpieces formed of metal sheet disks by the method of drawing on a hydraulic press. The test cylindrical pieces were made of three material grades: nickel alloy (Inconel 625), stainless steel (0H18N9) and deep-drawing steel (DC-04). The drawpieces have not been heat treated or annealed.*

### 1.2. Investigation methodology

*The objective of the investigation was to determine the possibility of applying the process of incremental flow forming for manufacturing drawpieces of hard-to-deform and easily strain hardening material, such as the nickel super alloy, Inconel 625.*

*For comparison, the possibilities of flow forming drawpieces of the 0H18N9 stainless steel and the DC-04 deep-drawing steel have also been determined.*

*In the initial investigation of the flow forming process, the drawpiece blanks have not been annealed.*

*The process of elongating flow forming has been investigated in the Metal Forming Institute's test centre of stamping by means of the MZH-400 flow forming machine provided with two rolls located opposite each other, controlled by means of a CNC control unit.*

W procesie zgniatania obrotowego stosowano optymalne parametry, uzyskane podczas poprzednich badań. Prędkość obrotowa wzornika wynosiła:

$$n = 500 \text{ obr/min,}$$

a prędkość posuwu rolek

$$p = 300 \text{ i } 350 \text{ mm/min.}$$

W procesie badawczym zgniatania obrotowego wydłużającego wytłoczek ze stopu niklu i stali nierdzewnej, nie uzyskanożądanego przemieszczenia materiału na skutek znacznego umocnienia. Zakładane wydłużenie pobocznic wytłoczek uzyskano jedynie na wytłoczkach ze stali głębokotłocznej DC-04.

W dalszych badaniach zastosowano operacje wyżarzania wytłoczek wyjściowych ze stopu niklu i stali nierdzewnej w piecu w temperaturze 1050 °C.

Następnie w procesie zgniatania obrotowego wydłużającego badano wielkości odkształcenia i wydłużenia wytłoczek walcowych, wykonanych ze wszystkich trzech rodzajów materiałów.

Odkształcenie względne określano wg wzoru:

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \cdot 100\%,$$

gdzie:

$t_0$  – grubość ścianki pobocznic przed zgniataniem obrotowym,

$t_1$  – grubość ścianki pobocznic po wydłużeniu.

Wydłużenie określano wg wzoru:

$$A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

gdzie:

$l_1$  – długość pobocznic po zgniataniu obrotowym,

$l_0$  – długość pobocznic przed zgniataniem obrotowym.

Ponadto określano chropowatość powierzchni na wydłużonych pobocznicach wytłoczek, odniesioną do nierówności o selektywnie małych odległościach wierzchołków, wyznaczaną przez dwa podstawowe parametry:

*The flow forming process has been performed with the optimum parameters obtained in the former investigation. The templet rotational speed was:*

$$n = 500 \text{ rpm}$$

*and the roll travel speed*

$$p = 300 \text{ and } 350 \text{ mm/min.}$$

*In the test process of elongating flow forming of the nickel alloy and stainless steel drawpieces, the desired material dislocation has not been obtained due to significant strain hardening. The expected elongation of the side wall has been obtained only on the DC-04 deep-drawing steel test pieces.*

*In the further investigation, the operation of annealing the nickel alloy and stainless steel drawpieces at 1050° C has been applied. Next, in the process of elongating flow forming, the magnitude of deformation and elongation of cylindrical drawpieces made of all the three material grades has been examined.*

*The true strain has been determined according to the formula:*

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \cdot 100\%,$$

*where:*

*$t_0$  – side wall thickness prior to flow forming,*

*$t_1$  – side wall thickness after elongation.*

*The elongation has been determined according to the formula:*

$$A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

*where:*

*$l_1$  – side wall length after flow forming,*

*$l_0$  – side wall length prior to flow forming.*

*In addition to that, the surface roughness on the elongated side walls has been determined as compared to unevenness with selectively short distances between apexes, determined by the two basic parameters:*

- średnią arytmetyczną odchylenia profilu od linii średniej

$$Ra = \sum \frac{y_n}{n},$$

- wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu

$$R_z = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5}{5} - \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{5}$$

gdzie:

$w_n$  – wzniesienie ponad linię średnią,  
 $D_n$  – wgłębienie poniżej linii średniej.

Pomiary chropowatości przeprowadzono na profilometrze firmy HOMMEL-ETAMIC Turbo Wave V 7,36 w Centrum Materiałoznawstwa i Obróbki Ciepłej Instytutu Obróbki Plastycznej.

### 1.3. Przebieg i wyniki badań

Wytłoczki (materiał wyjściowy) ze stopu niklu, wykonane z krążków blach o grubości 2,3 i 3,1 mm, przed i po wyżarzaniu, zginiatano obrotowo wydłużając dwukrotnie. Przed każdą operacją stosowano obróbkę cieplną.

Na rys. 1 przedstawiono wykonaną wytłoczkę po dwukrotnym procesie zginiatania obrotowego wydłużającego.

Wyniki pomiarów odkształcenia i wydłużenia uzyskane dla różnych próbek zestawiono w tablicach 1, 2, a wielkości uzyskanych odkształceń i wydłużeń dla dwóch operacji zginiatania obrotowego wydłużającego pokazano na rys. 2. Wielkość odkształceń i wydłużeń poszczególnych próbek wykonanych z wytłoczek z materiału wyjściowego o grubości 2,3 mm oznaczono numerami 1, 2, 3, 4, a dla próbek z materiału o grubości 3,1 mm oznaczono numerami 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a.

Wielkość odkształcenia dla trzech operacji zginiatania obrotowego przedstawiono na rys. 3.

- *arithmetic average of the declination from the average line*

$$Ra = \sum \frac{y_n}{n},$$

- *roughness height according to ten points of the profile*

$$R_z = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5}{5} - \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{5}$$

where:

$w_n$  – height above the average line,  
 $D_n$  – depth below the average line.

*Roughness measurements have been performed on a profile measurement gauge made by HOMMEL-ETAMIC Turbo Wave V 7.36 in the Centre of Material Science and Heat treatment of the Metal Forming Institute.*

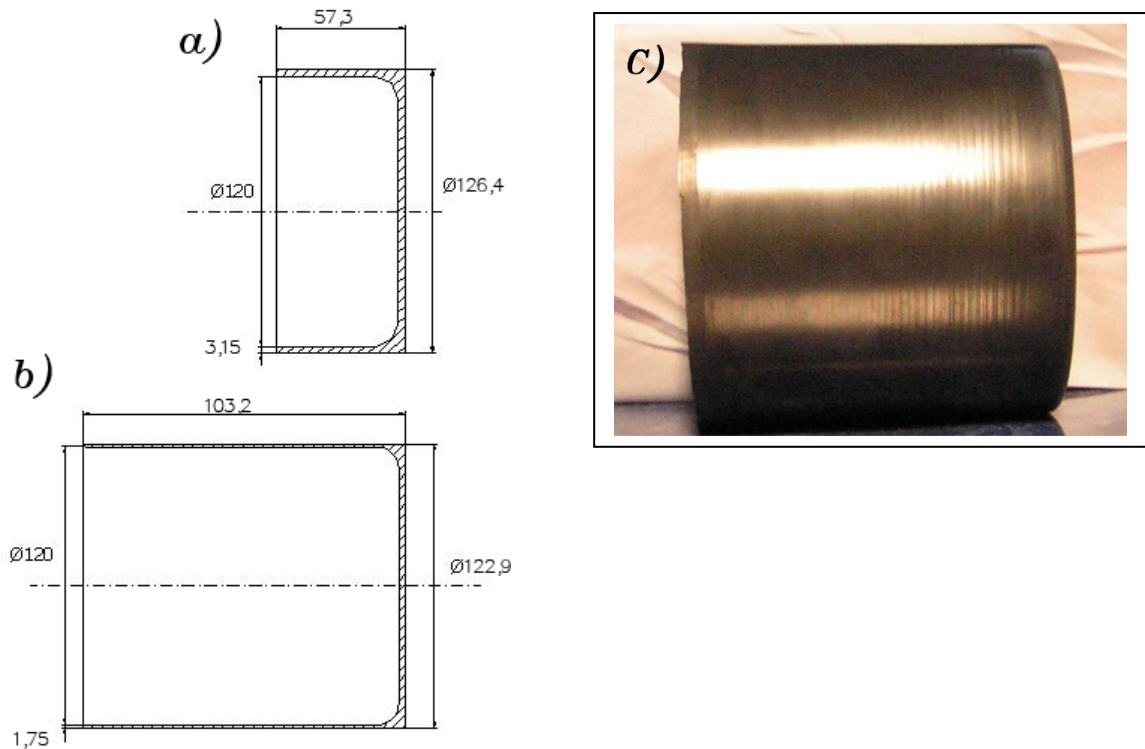
### 1.3. Investigation procedure and results

*The drawpieces ( initial material) made of nickel alloy sheet discs with the thickness of 2.3 and 3.1 mm have been subjected to elongating flow forming twice before and after annealing Heat treatment has been applied prior to each operation.*

*In fig. 1, a drawpiece subjected twice to the process of elongating flow forming can be seen.*

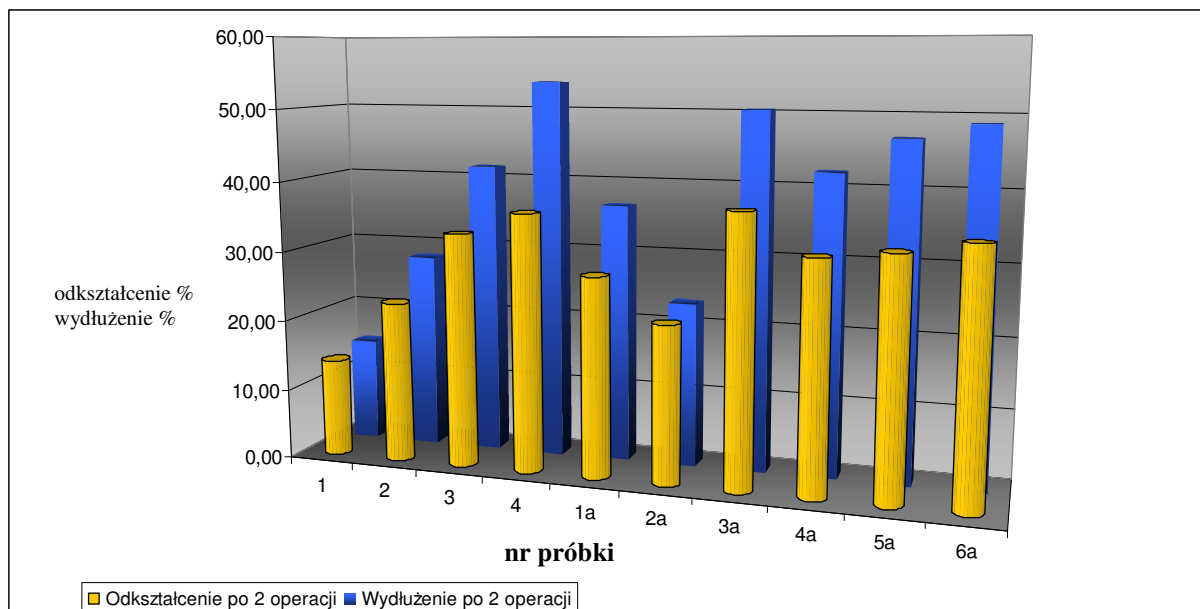
*The results of strain and elongation measurements obtained for various samples have been assembled in tables 1, 2; the magnitudes of strains and elongations for two elongating flow forming operations can be found in fig.2. The magnitudes of strain and elongation of the individual samples made of 2.3 mm thick initial material have been marked with numbers 1, 2, 3, 4 while those of 3.1 mm thick material have been marked with numbers 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a.*

*The strain magnitude for three flow forming operations has been shown in fig. 3.*



Rys. 1. Wytlóczka ze stopu niklu Inconel 625 po dwóch operacjach zgniatania obrotowego wydłużającego  
 a/ kształt i wymiary po pierwszej operacji wytłaczania, b/ kształt i wymiary po drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego, c/ widok gotowej wytlóczki po drugiej operacji zgniatania obrotowego

*Fig. 1. A drawpiece of Inconel 625 nickel alloy after two operations of elongating flow forming  
 a) shape and dimensions after the first drawing operation, b) shape and dimensions after the second elongating flow forming operation, c) a view of a ready made drawpiece after the second flow forming operation*



Rys. 2. Wydłużenie i odkształcenie wytlóczek ze stopu niklu Inconel 625 po drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego

Oznaczenia: 1, 2, 3, 4 – próbki z materiału o grubości 2,3 mm; 1a – 6a – próbki z materiału o grubości 3,1 mm

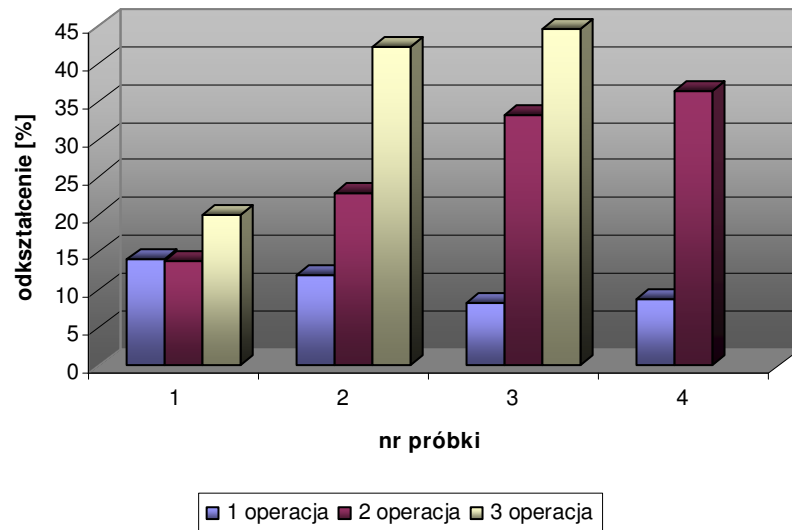
*Fig. 2. Elongation and strain of Inconel 625 drawpieces after the second elongating flow forming operation  
 Designations: 1, 2, 3, 4 – samples of 2.3 mm thick material; 1a – 6a – samples of 3.1 mm thick material*

Tablica 1. Wyniki pomiarów wytoczek ze stopu niklu Inconel 625 przed i po pierwszej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego [1], [2]  
 Table 1. Measurement results of Inconel 625 alloy drawpieces before and after the first operation of elongating flow forming [1], [2]

Lp. No.	Pomiary po toczeniu <i>Measurements after drawing</i>				Pomiary po pierwszej operacji zgniatania obrotowego <i>Measurements after the first flow forming operation</i>						Posuw [mm/min] <i>Travel</i>	Pręđ. obr. [obr/min] <i>Rotational speed</i> [rpm]	
	Średnica zew. Ø [mm] <i>Outer diameter</i>	Średnica wew. Ø [mm] <i>Inner diameter</i>	Śr. gr. ścianki [mm] <i>Average wall thickness</i>	Wysokość [mm] <i>Height</i>	Średnica zew. Ø [mm] <i>Outer diameter</i>	Średnica wew. Ø [mm] <i>Inner diameter</i>	Śr. gr. ścianki [mm] <i>Average wall thickness</i>	Wysokość [mm] <i>Height</i>	Odkształcenie żądane [%] <i>Desired strain</i>	Odkształcenie względne [%] <i>True strain</i>			Wydłużenie [%] <i>Elongation</i>
<b>Inconel 625 – 2,3 mm</b>													
1	125,7	120,3	2,46	54,4	126,1	121,3	2,11	62,4	37,5	14,23	14,7	300	500
2	125,1	119,9	2,31	57,8	125,2	120,8	2,03	63,7	37,5	12,12	10,21		
3	125,2	119,9	2,3	58	125,5	120,7	2,11	63,6	37,5	8,26	9,65	350	500
4	124,9	119,8	2,27	57,9	125,4	120,7	2,07	62,4	37,5	8,81	7,77		
<b>Inconel 625 – 3,1 mm</b>													
1a	126,5	119,7	3,19	57,8	126,8	120,6	2,83	64	37,5	11,29	10,69	300	500
2a	126,4	119,7	3,11	57,4	126,6	120,7	2,77	66,2	37,5	10,93	15,33		
3a	126,4	119,7	3,15	57,3	126,7	120,6	2,81	64,2	37,5	10,79	12,04	350	500
4a	126,5	119,7	3,19	57,8	126,6	120,6	2,79	63,8	37,5	12,54	10,38		
5a	126,4	119,7	3,2	57,8	126,5	120,7	2,78	64,3	37,5	13,13	11,24	300	500
6a	126,5	119,8	3,06	59,9	126,7	120,6	2,76	64,5	37,5	9,8	7,68		

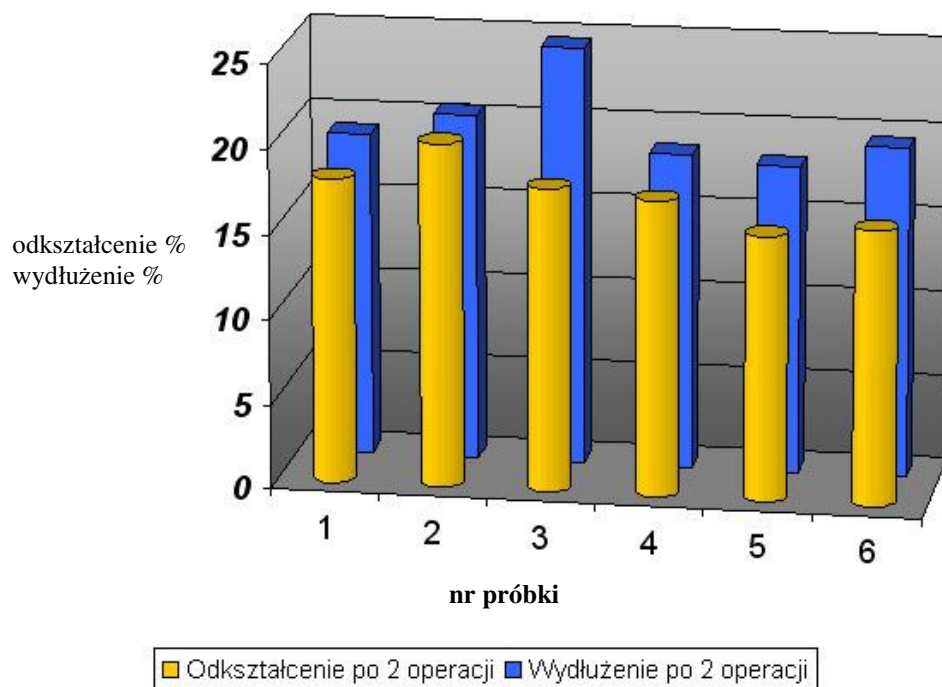
Tablica 2. Wyniki pomiarów wytłoczek ze stopu niklu Inconel 625 po drugiej i trzeciej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego  
 Table 2. Measurement results of Inconel 625 drawpieces after the second and third operation of elongating flow forming

Lp. No.	Pomiary po drugiej operacji zgniatania obrotowego Measurements after the second flow forming operation							Pomiary po trzeciej operacji zgniatania obrotowego Measurements after the third flow forming operation							Prędk. obr. [obr/min] Travel
	Średnica zew. Ø [mm] Outer diameter	Średnica wew. Ø [mm] Inner diameter	Śr. gr. ścianki Average wall thickness	Wysokość [mm] Height	Odkształcenie żądane [%] Desired strain	Odkształcenie względne [%] True strain	Wydłużenie [%] Elongation	Średnica zew. Ø [mm] Outer diameter	Średnica wew. Ø [mm] Inner diameter	Śr. gr. ścianki Average wall thickness	Wysokość [mm] Height	Odkształce- nie żądane [%] Desired strain	Odkształcenie względne [%] True strain	Wydłużenie [%] Elongation	
<b>Inconel 625 – 2,3 mm</b>															
1	125,1	121,8	1,8	71,6	29,3	13,86	14,70	125,1	122,2	1,44	87,8	33	20,0	40,7	
2	125,2	122,2	1,57	81,6	34	22,84	28,10	x	122,3	0,91	1,33	31	42,2	57,2	
3	126	122,8	1,41	90,1	41,4	33,14	41,70	x	122,1	0,82	145,4	33	44,7	61,4	
4	126,4	123,5	1,32	96	41,4	36,34	53,80	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Inconel 625 – 3,1 mm</b>															
1a	127,3	122,9	2,03	87,5	26,7	28,20	36,70	125,4	123,3	1,38	122,7	30	32,1	40,2	
2a	127,1	122,2	2,15	81,6	26,7	22,25	23,30	125,8	123,4	1,38	123,1	30	35,8	50,9	
3a	127,4	123,6	1,75	96,5	40,2	37,70	50,30	125,8	123,7	1,16	143,7	30	34,0	48,9	
4a	127,4	123,4	1,89	90,7	42,8	32,2	42,2	125,6	123	1,41	119,3	30	25,3	31,5	
5a	127,1	123,35	1,86	94,4	46,4	33,2	46,8	125,4	123,1	1,35	125,1	30	27,4	32,5	
6a	127,1	123,4	1,8	96	48,2	34,87	48,8	125,2	123,2	1,29	125	30	28,2	33,3	



Rys. 3. Wartości odkształceń [%] wytłoczek ze stopu niklu Inconel 625 uzyskane w poszczególnych operacjach zgniatania obrotowego wydłużającego przy grubości krążka wyjściowego 2,3 mm  
Oznaczenia: 1, 2, 3, 4 – próbki z materiału o grubości 2,3 mm

Fig. 3. Strain values [%] of Inconel 625 nickel alloy drawpieces obtained in the individual elongating flow forming operations with the initial disk thickness of 2.3 mm  
Designations: 1, 2, 3, 4 – samples of 2.3 mm thick material



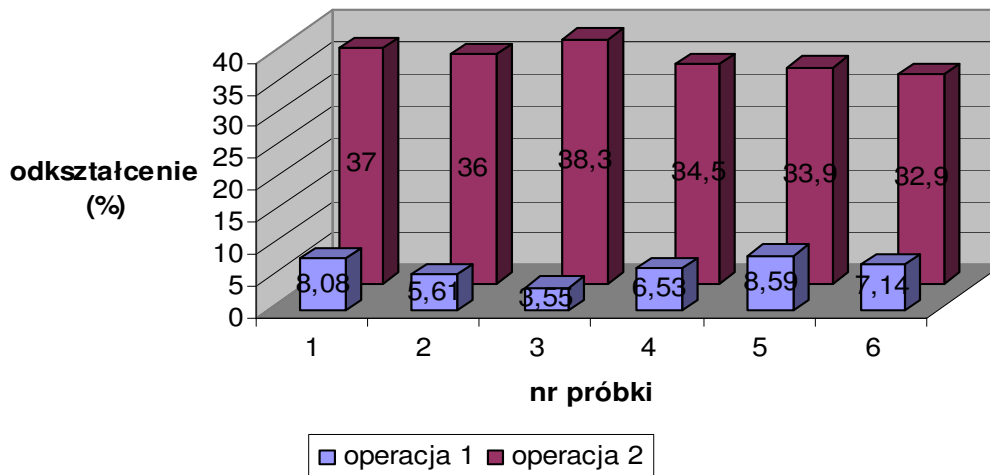
Rys. 4. Wydłużenie i odkształcenie wytłoczek po wyżarzaniu ze stali nierdzewnej 0H18N9 po drugiej operacji zgniatania obrotowego

Oznaczenia: 1–6 – próbki z materiału o grubości 3,0 mm

Fig. 4. Elongation and strain of 0H18N9 stainless steel annealed drawpieces after the second operation of flow forming  
Designations: 1 -6 – samples of 3.0 mm thick material



## Wartości odkształcenia w poszczególnych operacjach



Rys. 5. Wartości odkształceń [%] wyciągów po wyżarzaniu ze stali nierdzewnej 0H18N9 uzyskane w pierwszej i drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego, wykonane z krążków o grubości 3,0 mm  
Oznaczenia: 1–6 – próbki z materiału o grubości 3,0 mm

Fig. 5. Strain values of annealed 0H18N9 stainless steel drawpieces obtained in the first and in the second operation of elongating flow forming; the samples had been made of 3.0 mm thick disks  
Designations: 1–6 – samples of material with the thickness of 3.0 mm

Wyciązki ze stali nierdzewnej gatunku 0H18N9 po wyżarzaniu, wykonane z krążków blachy o grubości 3 mm, również kształtowano metodą zgniatania obrotowego wydłużającego.

Wyniki pomiarów zamieszczono w tablicach 3 i 4, a wielkość uzyskanych odkształceń i wydłużeń pokazano na rys. 4 i 5.

Wyciązki ze stali głębokotłocznej w gatunku DC-04 wykonane z krążków blach o grubości 2 i 3 mm, zgniatano obrotowo wydłużająco bez stosowania międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.

Wyniki pomiarów wyciągów zamieszczono w tablicach 5 i 6, a wielkości uzyskanych odkształceń i wydłużeń pokazano na rys. 6 i 7.

Na wydłużonej poboczniczy wyciągów po zgniataniu obrotowym wydłużającym wykonano pomiary chropowatości na wybranych losowo wyciągach.

Wyniki pomiarów, wraz z wykresami, dla wyciągów ze stopu niklu Inconel 625 po trzeciej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego, wykonanych z blachy o grubości 2,3 i 3,1 mm, pokazano na wykresach (rys.8 i 9), a po drugiej operacji dla blachy o grubości 2,3 mm na rys.10.

Drawpieces of stainless steel grade 0H18N9 after annealing, made of 3 mm thick sheet disks have also been formed by the method of elongating flow forming.

Measurement results can be found in tables 3 and 4 while the magnitude of the strains and elongations is shown in figs. 4 and 5.

DC-04 deep-drawing steel drawpieces made of sheet disks with the thickness of 2 and 3 mm have been subjected to elongating flow forming without the application of interoperation heat treatment.

The measurement results of the drawpieces can be found in tables 5 and 6; their strain and elongation magnitudes are shown in fig. 6 and 7.

On the elongated side wall of random selected drawpieces, roughness measurements have been performed.

The measurement results and curves for Inconel 625 nickel alloy samples made of 2.3 and 3.1 mm thick sheets after the third operation of elongating flow forming can be seen in the diagrams (figs 8 and 9), those for 2.3 mm thick sheet after the second operation are shown in fig. 10.

Tablica 3. Wyniki pomiarów wytłoczek po wyżarzaniu ze stali nierdzewnej 0H18N9 przed zgniataniem obrotowym i po pierwszej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego

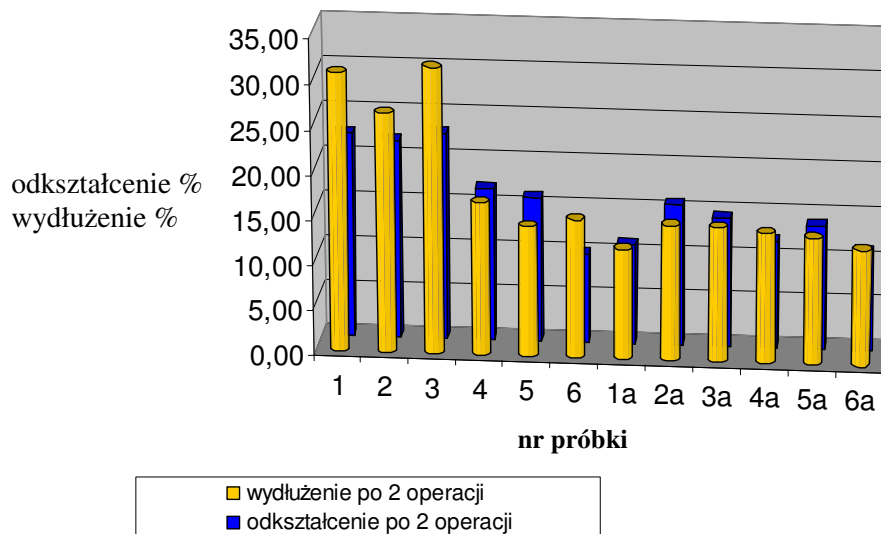
Table 3. Measurement results of annealed 0H18N9 stainless steel drawpieces prior to flow forming and after the first elongating flow forming operation

Lp. No.	Pomiary przed zgniataniem obrotowym Measurement prior to flow forming				Pomiary po pierwszej operacji zgniatania obrotowego Measurement after the first flow forming operation						Pręđ. obr. [obr/min] Rotational speed [rpm]	
	Średnica zew. [mm] Outer diameter	Średnica wew. [mm] Inner diameter	Śr. gr. ścianki [mm] Average wall thickness	Wysokość [mm] Height	Średnica zew. [mm] Outer diameter	Średnica wew. [mm] Inner diameter	Śr. gr. ścianki [mm] Average wall thickness	Wysokość [mm] Height	Odszt. żądane [%] Desired strain	Odszt. względne [%] True strain		Wydłużenie [%] Elongation
<b>0H18N9 - 3 mm</b>												
1	126,2	119,8	3,04	57,5	125,6	120,5	2,45	68,5	37,5	19,41	19,1	300
2	126,7	119,8	3,09	57,3	125,7	120,5	2,51	69,0	37,5	18,77	20,4	
3	126,9	119,7	3,2	57,8	125,8	120,5	2,51	72,0	37,5	21,56	24,6	350
4	126,7	119,8	3,1	57,5	125,8	120,5	2,54	68,2	37,5	18,06	18,6	
5	126,6	119,8	3,18	57,9	125,6	120,5	2,55	68,4	37,5	19,81	18,1	500
6	126,3	119,8	3,06	57,3	125,7	120,5	2,54	68,5	37,5	16,99	19,5	

Tablica 4. Wyniki pomiarów wytłoczek po wyżarzaniu ze stali nierdzewnej 0H18N9 po drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego

Table 4. Measurement results of annealed 0H18N9 stainless steel drawpieces after the second elongating flow forming operation

Lp. No.	Pomiary po drugiej próbie zgniatania Measurements after the second flow forming operation							Posuw [mm/min] Travel	Pręđ. obr. [obr/min] Rotational speed [rpm]
	Średnica zew. [mm] Outer diameter	Średnica wew. [mm] Inner diameter	Śr. gr. ścianki [mm] Average wall thickness	Wysokość [mm] Height	Odkoszt. żądane [%] Desired strain	Odkoszt. względne [%] True strain	Wydłużenie [%] Elongation		
<b>0H18N9 - 3 mm</b>									
1	125,45	122,9	1,63	100,4	36	33,5	46,6	300	500
2	125,45	123,6	1,46	112	36	41,9	62,3		
3	126,15	124	1,52	114,4	36	39,4	58,9		
4	-	-	-	-	-	-	-	350	
5	125,55	122,9	1,67	101,2	36	34,4	48		
6	125,5	123,2	1,61	102,7	36	36,5	49,9		



Rys. 6. Wydłużenie i odkształcenie wytłoczek ze stali głębokotłocznej DC-04 po drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego

Oznaczenia: 1–6 – próbki z materiału o grubości 2,0 mm; 1a–6a – próbki z materiału o grubości 3,0 mm

Fig. 6. Elongation and strain of DC-04 deep-drawing steel samples after the second operation of elongating flow forming

Designations: 1 – 6 samples of 2.0 mm thick material; 1a – 6a – samples of 3.0 mm thick material

Tablica 5. Wyniki pomiarów wytłoczek ze stali głębokotłocznej DC-04 przed i po pierwszej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego  
 Table 5. Measurement results of DC-04 deep-drawing steel drawpieces before and after the first operation of elongating flow forming

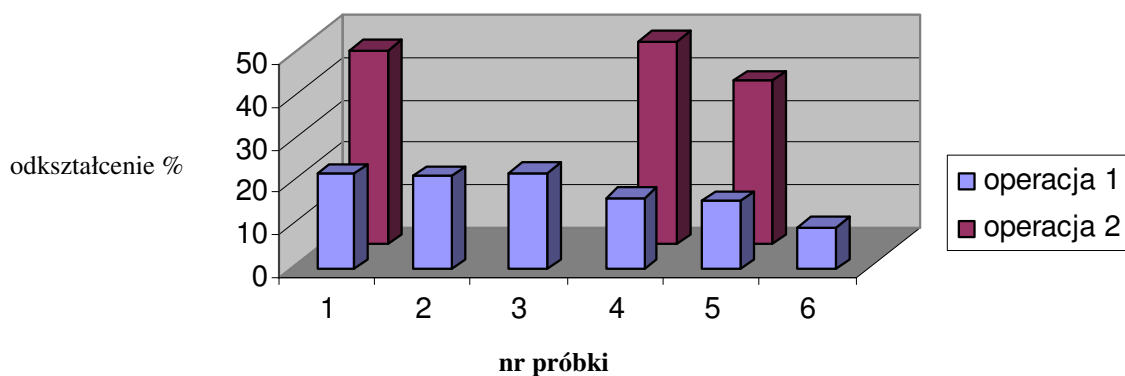
Lp. No.	Pomiary przed zgniataniem obrotowym <i>Measurement prior to flow forming</i>					Pomiary po pierwszej operacji zgniatania obrotowego <i>Measurement after the first flow forming operation</i>						Pręđ. obr. [obr/min] <i>Rotational speed [rpm]</i>	
	Średnica zew. [mm] <i>Outer diameter</i>	Średnica wew. [mm] <i>Inner diameter</i>	Śr. gr. ścianki [mm] <i>Average wall thickness</i>	Wysokość [mm] <i>Height</i>	Średnica zew. [mm] <i>Outer diameter</i>	Średnica wew. [mm] <i>Inner diameter</i>	Śr. gr. ścianki [mm] <i>Average wall thickness</i>	Wysokość [mm] <i>Height</i>	Odkoszt. żądane [%] <i>Desired strain</i>	Odkoszt. względne [%] <i>True strain</i>	Wydłużenie [%] <i>Elongation</i>		Posuw [mm/min] <i>Travel</i>
<b>DC 04 - 2 mm</b>													
1	124,8	120,1	1,94	59,1	123,5	120,4	1,5	77,4	37,5	22,68	30,96	300	500
2	124,8	119,9	1,91	59	123,5	120,3	1,49	74,7	37,5	21,99	26,61		
3	124,75	120	1,92	58,5	123,4	120,3	1,48	77,1	37,5	22,92	31,79	350	500
4	124,8	119,7	1,95	59,2	124	120,4	1,62	69,3	37,5	16,92	17,06		
5	124,9	120,1	1,93	60,5	124	120,2	1,62	69,3	37,5	16,06	14,55	350	500
6	124,9	120	1,91	60,2	123,8	120,1	1,72	69,5	37,5	9,95	15,45		
<b>DC 04 - 3 mm</b>													
1a	126,3	119,8	2,96	58,15	125,5	120,1	2,63	65,3	37,5	11,15	12,30	300	500
2a	126,2	119,9	2,99	58,3	125,4	120,1	2,52	67,1	37,5	15,72	15,09		
3a	126,3	119,5	2,99	57,8	125,4	120,1	2,56	66,5	37,5	14,38	15,05	350	500
4a	126,2	119,8	3	57,8	125,6	120,2	2,64	66,2	37,5	12	14,53		
5a	126,2	119,8	2,97	58	125,4	120,1	2,56	66,2	37,5	13,8	14,14	350	500
6a	126,1	119,75	2,97	58	125,5	120	2,64	65,5	37,5	11,11	12,93		

Tablica 6. Wyniki pomiarów wytłoczek ze stali głębokotłocznej DC-04 po drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego

Table 6. Measurements results of DC-04 deep-drawing steel samples after the second operation of elongating flow forming

Lp. No.	Pomiary po drugiej próbie zgniatania Measurements after the second flow forming operation							Posuw [mm/min] Travel	Pręđ. obr. [obr./min] Rotational speed [rpm]
	Średnica zew. [mm] Outer diameter	Średnica wew. [mm] Inner diameter	Śr. gr. ścianki [mm] Average wall thickness	Wysokość [mm] Height	Odszt. żądane [%] Desired strain	Odszt. względne [%] True strain	Wydłu-żenie [%] Elongation		
<b>DC-04 – 2 mm</b>									
1	-	121,2	0,81	122,7	37,5	46	58,5	300	500
2	-	-	-	-	-	-	-		
3	-	-	-	-	-	-	-		
4	122,8	121,5	0,84	109,9	37,5	48,07	58,6	350	
5	123,3	121,5	1	109,6	37,5	38,54	58,2		
6	-	-	-	-	-	-	-		
<b>DC-04 – 3 mm</b>									
1a	-	121,9	1,12	136,8	36,6	57,41	109,49	300	500
2a	-	121,4	1,13	130,3	36,6	55,16	94,19		
3a	-	-	-	-	-	-	-		
4a	-	122,3	1,15	134,2	36,6	56,44	102,72	350	
5a	-	-	-	-	-	-	-		
6a	-	-	-	-	-	-	-		

### Wartość odkształcenia w poszczególnych operacjach

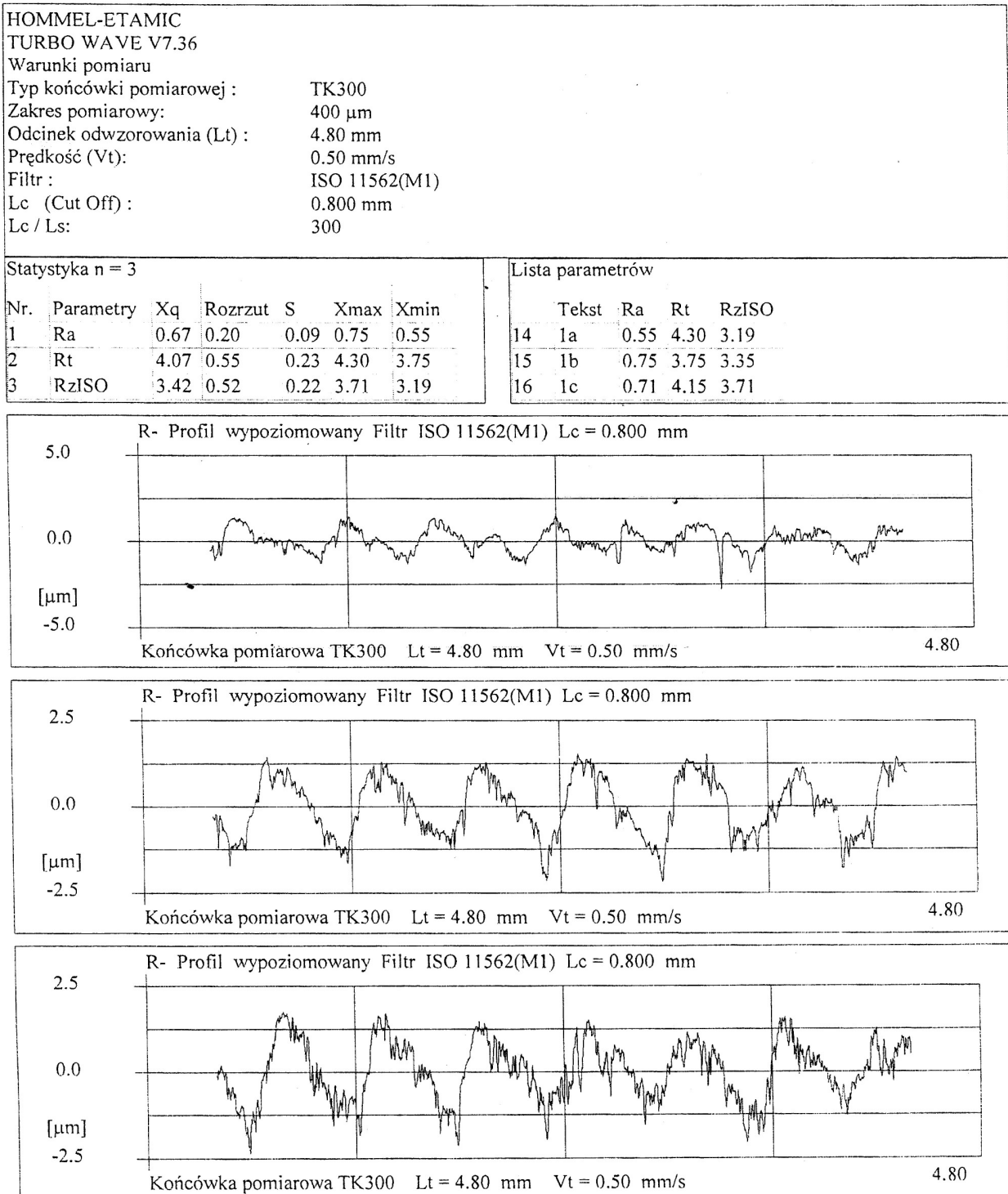


Rys. 7. Wartości odkształceń [%] w wytłoczkach ze stali głębokotłocznej DC-04 uzyskane w pierwszej i drugiej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego

Oznaczenia: 1a–6a – próbki z materiału o grubości 3,0 mm

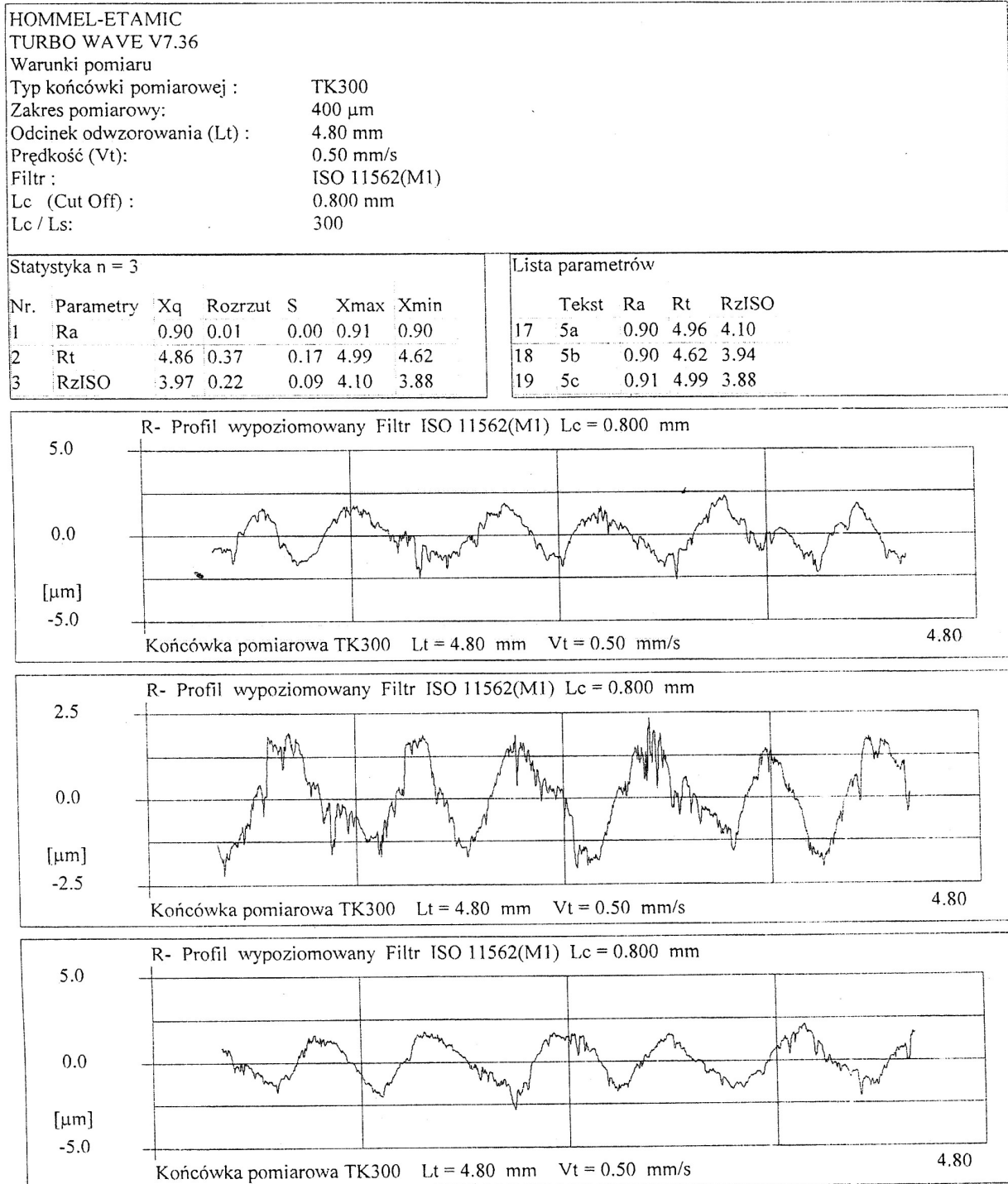
Fig. 7. Strain values [%] in the drawpieces made of DC-04 deep-drawing steel obtained in the first and the second operation of elongating flow forming

Designations: 1a – 6a - samples of 3.0 mm thick material



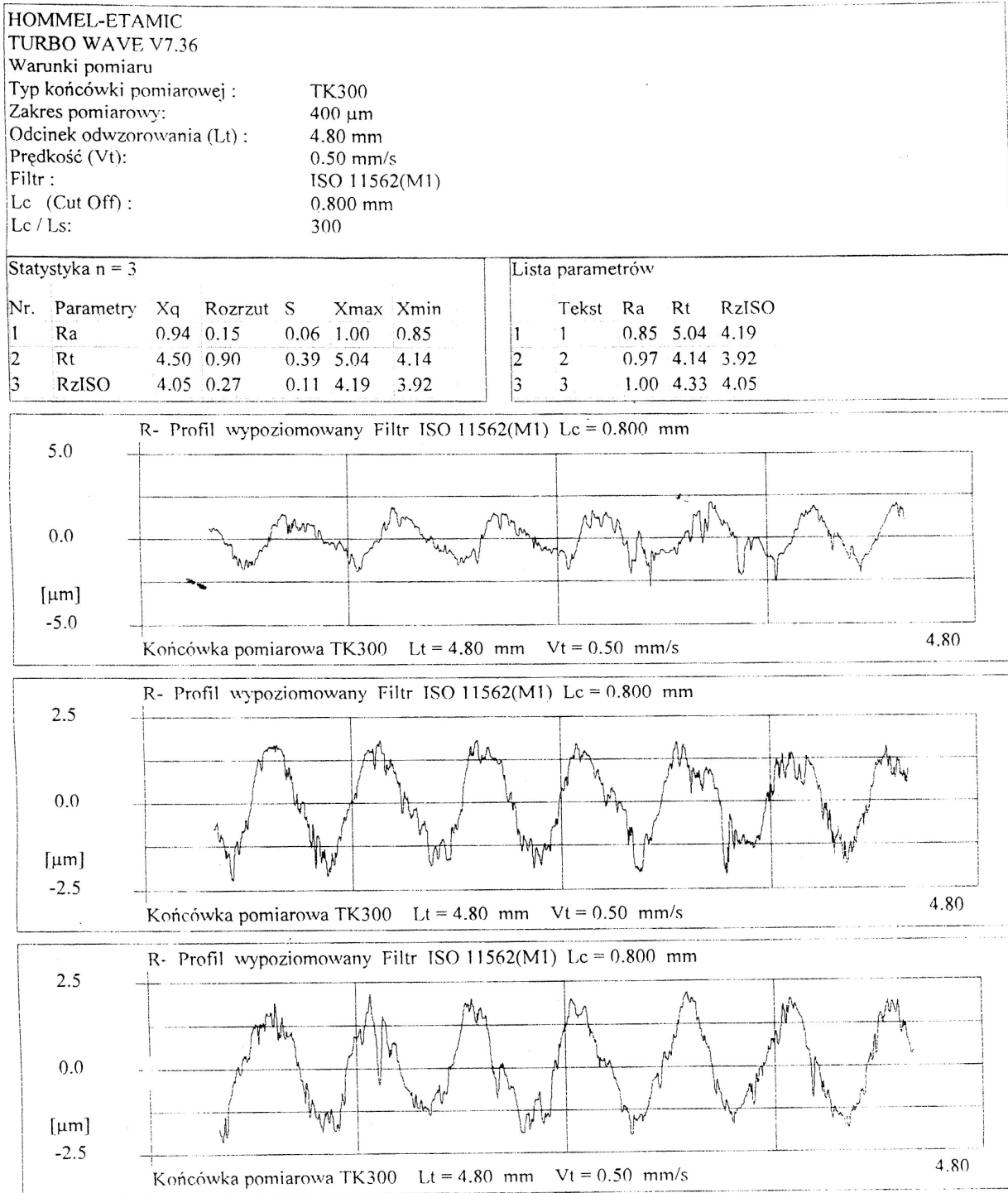
Rys. 8. Wyniki pomiarów i wykres chropowatości dla wylóczki z Inconelu 625 po trzeciej operacji.  
Materiał wyjściowy - blacha o grubości 2,3 mm

Fig. 8. Measurements results and roughness curve of an Inconel 625 sample after the third operation.  
Initial material - 2.3 mm thick sheet



Rys. 9. Wyniki pomiarów i wykres chropowatości dla wylęczi z Inconelu 625 po trzeciej operacji.  
Materiał wyjściowy - blacha o grubości 3,1 mm

Fig. 9. Measurements results and roughness curve of an Inconel 625 sample after the third operation.  
Initial material - 3.1 mm thick sheet



Rys. 10. Wyniki pomiarów i wykres chropowatości dla wytłoczki z Inconelu 625 po drugiej operacji.  
Materiał wyjściowy - krążek z blachy o grubości 2,3 mm

Fig. 10. Measurements results and roughness curve of an Inconel 625 sample after the second operation.  
Initial material - 2.3 mm thick sheet disk



Wyniki pomiarów chropowatości wraz z wykresami dla wytłoczek ze stali nierdzewnej w gatunku 0H18N9, wykonanych z blachy o grubości 2 mm pokazano na wykresie - rys.11.

Wyniki pomiarów wraz z wykresami dla wytłoczek ze stali głęboko tłocznej w gatunku DC-04, wykonanych z blachy o grubości 2 mm pokazano na wykresie - rys.12.

Na wytłoczkach ze stopu niklu Inconel 625 wydłużonych w procesie zgniatania obrotowego pomierzono grubości ścianki w określonych odległościach od dna. Wyniki pomiarów grubości ścianki zamieszczono w tablicy 7 i 8.

*Roughness measurement results and diagrams for 0H18N9 stainless steel disks with the thickness of 2 mm have been shown in fig. 11*

*Roughness measurement results and diagrams for DC-04 deep drawing steel drawpieces with the thickness of 2 mm have been shown in fig. 12*

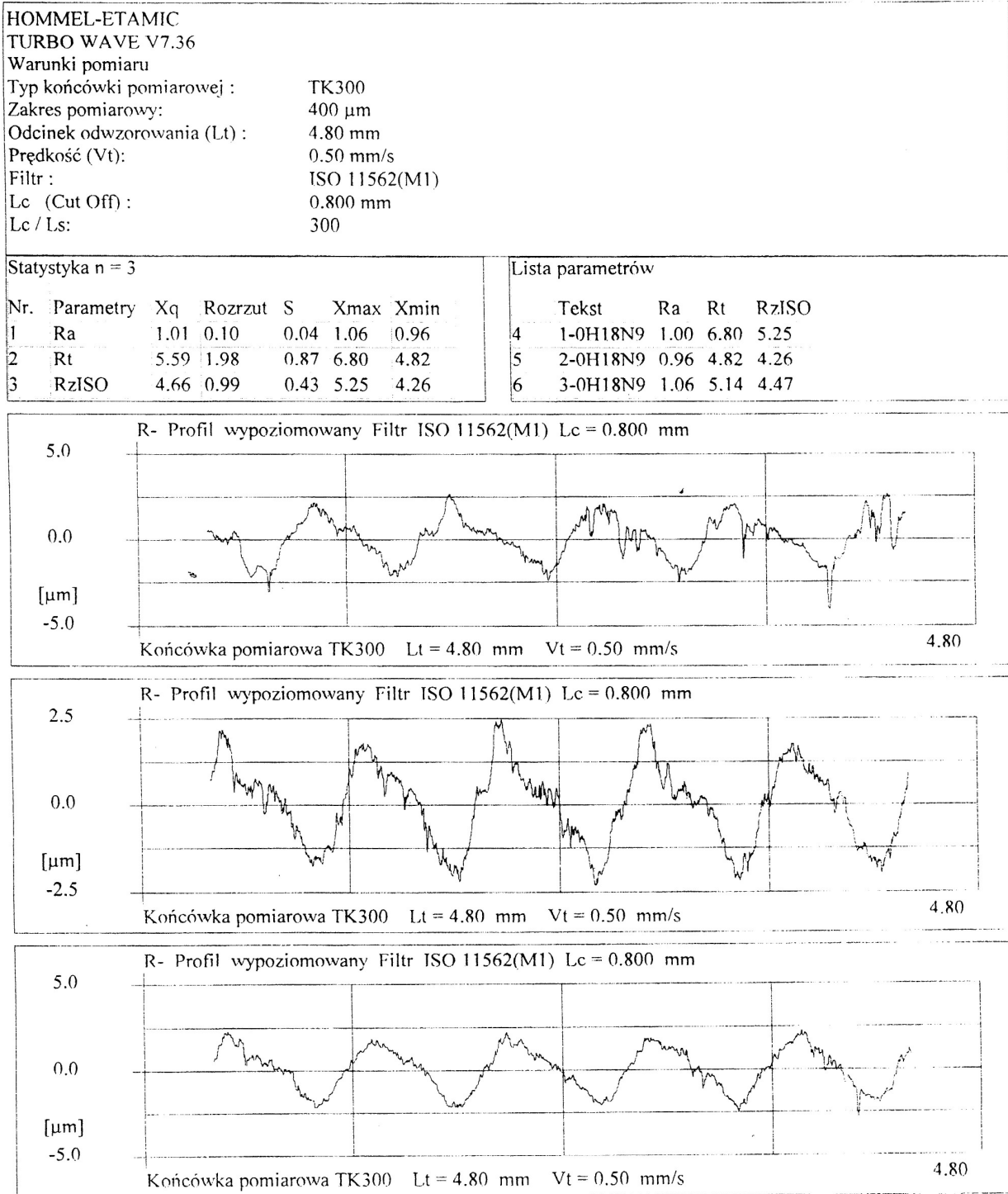
*On the Inconel 625 drawpieces elongated in the flow forming process, wall thickness has been measured at predetermined distances from the bottom. The wall thickness measurement results can be found in tables 7 and 8.*

Tablica 7. Wyniki pomiarów grubości ścianki wytłoczek ze stopu niklu Inconel 625 po 2 operacji zgniatania obrotowego

Table 7. Wall thickness measurement results of Inconel 625 alloy drawpieces after the second flow forming operation

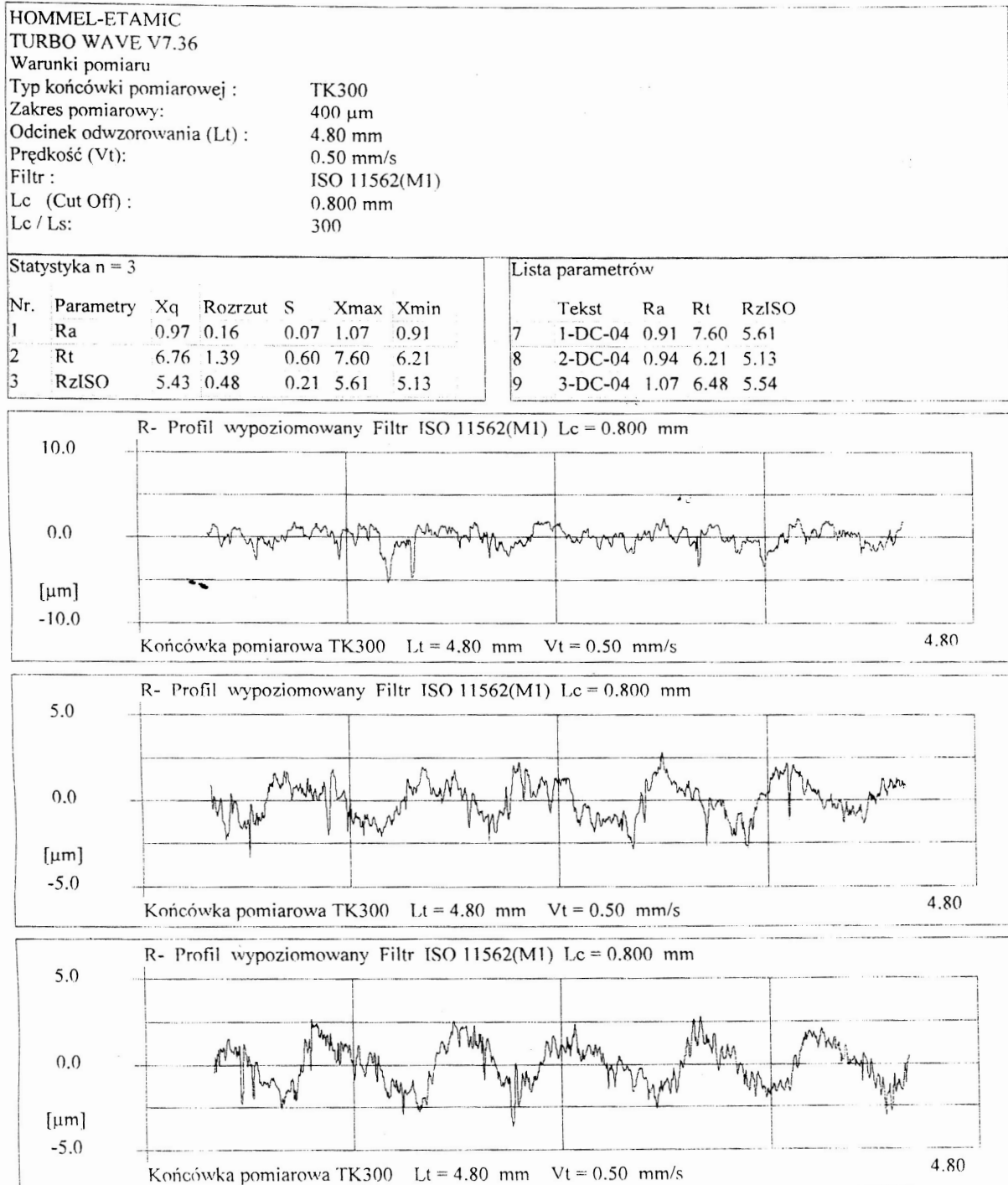
<b>Pomiar grubości ścianki wytłoczki po 2 operacji</b>									
<i>Drawpiece wall thickness measurement after the second operation</i>									
<b>2,3 mm</b>				<b>3,1 mm</b>					
<b>Numer próbki</b>									
<i>Sample number</i>									
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1a</b>	<b>2a</b>	<b>3a</b>	<b>4a</b>	<b>5a</b>	<b>6a</b>
1,75	1,44	1,31	1,08	1,89	2	1,66	1,76	1,81	1,7
1,83	1,56	1,39	1,25	2,03	2,13	1,74	1,92	1,91	1,75
1,87	1,65	1,43	1,35	2,1	2,21	1,77	1,95	1,95	1,82
1,89	1,68	1,48	1,38	2,15	2,23	1,8	1,99	1,95	1,89
1,83	1,66	1,5	1,4	2,16	2,19	1,82	1,99	1,91	1,85
1,81	1,63	1,45	1,42	2	2,2	1,82	1,86	1,79	1,8
1,68	1,53	1,38	1,25	1,9	2,15	1,72	1,79	1,61	1,73
1,79	1,38	1,29	1,18	1,87	2,03	1,7	1,78	1,74	1,69
1,83	1,54	1,38	1,29	2	2,12	1,67	1,87	1,86	1,77
1,87	1,57	1,45	1,37	2,09	2,2	1,7	1,95	1,96	1,9
1,85	1,62	1,46	1,39	2,13	2,18	1,81	1,97	1,95	1,9
1,81	1,59	1,45	1,42	2,15	2,17	1,81	1,94	1,97	1,87
	1,55	1,42	1,39	2,04	2,19	1,85	1,82	1,88	1,82
	1,53	1,36	1,28	1,94	2,15	1,71	1,89	1,7	1,72
						1,6			1,68
						1,82			1,87

<b>Pomiar grubości ścianki wytłoczki po 2 operacji (wartość średnia)</b>									
<i>Drawpiece wall thickness measurement after the second operation (average value)</i>									
<b>2,3 mm</b>				<b>3,1 mm</b>					
<b>Numer próbki</b>									
<i>Sample number</i>									
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1a</b>	<b>2a</b>	<b>3a</b>	<b>4a</b>	<b>5a</b>	<b>6a</b>
1,82	1,57	1,41	1,32	2,03	2,15	1,75	1,90	1,86	1,80



Rys. 11. Wyniki pomiarów i wykres chropowatości wyłoczeki ze stali nierdzewnej 0H18N9 – blacha o grubości 2,0 mm

Fig. 11. Roughness measurement results and diagrams of a 0H18N9 stainless steel drawpiece – sheet thickness 2.0 mm



Rys. 12. Wyniki pomiarów i wykres chropowatości dla wytłoczki ze stali głębokotłocznej DC-04 – blacha o grubości 2,0 mm

Fig. 12. Roughness measurement results and diagrams of a DC-04 deep-drawing steel drawpiece – sheet thickness 2.0 mm

Tablica 8. Wyniki pomiarów grubości ścianki wytłoczki ze stopu niklu Inconel 625 po 3 operacji zgniatania obrotowego  
 Table 8. Wall thickness measurement results of an Inconel 625 alloy drawpiece after the third operation of flow forming

<b>Pomiar grubości ścianki wytłoczki po 3 operacji</b>									
<i>Wall thickness measurement of a drawpiece after the third operation</i>									
<b>2,3 mm</b>				<b>3,1 mm</b>					
<b>Numer próbki</b>									
<i>Sample number</i>									
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1a</b>	<b>2a</b>	<b>3a</b>	<b>4a</b>	<b>5a</b>	<b>6a</b>
1,3	0,81	0,8		1,36	1,28	1,05	1,36	1,28	1,31
1,43	0,9	0,87		1,41	1,36	1,2	1,42	1,36	1,34
1,52	0,95	0,9		1,42	1,4	1,16	1,47	1,42	1,37
1,5	0,95	0,91		1,43	1,45	1,19	1,46	1,43	1,37
1,44	0,94	0,9		1,45	1,46	1,25	1,47	1,4	1,36
1,48	0,94	0,85		1,43	1,43	1,27	1,43	1,38	1,36
1,31	0,95	0,75		1,29	1,42	1,26	1,38	1,28	1,3
1,43	0,91	0,69		1,28	1,38	1,14	1,35	1,15	1,27
1,52	0,84	0,68		1,33	1,3	0,99	1,33	1,31	1,25
1,52	0,72	0,78		1,38	1,41	1,07	1,41	1,37	1,2
1,44	0,84	0,89		1,4	1,41	1,14	1,47	1,41	1,27
1,4	0,92	0,92		1,4	1,36	1,17	1,46	1,41	1,29
	0,92	0,94		1,45	1,39	1,2	1,45	1,41	1,33
	0,96	0,95		1,43	1,4	1,25	1,4	1,41	1,34
	1	0,85		1,32	1,35	1,25	1,37	1,32	1,31
	0,96	0,73		1,28	1,27	1,16	1,36	1,26	1,25
	0,86	0,68				1,03			1,21
	0,95	0,65				1,01			1,14

<b>Pomiar grubości ścianki wytłoczki po 3 operacji (wartość średnia)</b>									
<i>Wall thickness measurement of a drawpiece after the third operation (average value)</i>									
<b>2,3 mm</b>				<b>3,1 mm</b>					
<b>Numer próbki</b>									
<i>Sample number</i>									
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1a</b>	<b>2a</b>	<b>3a</b>	<b>4a</b>	<b>5a</b>	<b>6a</b>
1,44	0,89	0,83	-	1,38	1,39	1,16	1,42	1,35	1,31

Badania stopu niklu Inconel 625 przeprowadzono w ramach projektu rozwojowego nr R1502703 pt.: „Technologia kształtowania plastycznego części silników lotniczych z nadstopów niklu z zastosowaniem procesów zgniatania obrotowego i wyoblania”.

Badania na pozostałych materiałach były realizowane w ramach pracy statutowej nr BT 901.54.000 pt. „Badania innowacyjnych technologii tłoczenia, wyoblania i zgniatania obrotowego, szczególnie wyrobów o złożonych kształtach z trudnoodkształcalnych i szybko

*Inconel 625 nickel alloy investigation has been performed within the development project no. R1502703 entitled “The technology of plastic forming of air plain engine parts of nickel superalloys with the application of the processes of flow forming and spinning*

*Investigation of the other materials has been performed within the statute work no. BT 901.54.000 entitled “Investigation of innovative technologies of stamping, spinning and flow forming, especially of complex shaped products of hard-to-deform materials and*

umacniających się materiałów z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych”.

*easily strain hardening materials, with the use of modern computer techniques”.*

## 2. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Dotychczasowe wyniki badań kształtowania metodą zgniatania obrotowego stopu niklu Inconel 625 potwierdzają, że stop ten jest trudno odkształcalnym materiałem w procesach kształtowania metodami obróbki plastycznej. Na skutek odkształcenia plastycznego wyroby ze stopu niklu ulegają bardzo szybkiemu umocnieniu.
2. Niedogodnością przy kształtowaniu wyrobów ze stopu niklu Inconel 625 metodami obróbki plastycznej jest jego skłonność do znacznego odsprężynowania po uwolnieniu sił zewnętrznych.
3. Zjawisko to występuje szczególnie w procesie zgniatania obrotowego, gdzie przemieszczenie materiału odbywa się za pomocą rolek. W takim procesie technologicznym styk rolki kształtującej z materiałem jest prawie punktowy. Sprzyja to znacznemu odsprężynowaniu powierzchni odkształconej.
4. W procesie, w którym wymagana jest duża redukcja grubości ścianki wytłoczki zaleca się stosować zgniatanie obrotowe wydłużające.
5. W końcowej operacji kalibrującej należy stosować większą ilość rolek lub kulek kształtujących.
6. Obróbka cieplna stosowana przed operacją kalibrowania ogranicza lub eliminuje zjawisko odsprężynowania powierzchni odkształconej.
7. Maksymalne odkształcenie względne dla stopu niklu, uzyskane w trzech operacjach zgniatania obrotowego, wynosiło  $\varepsilon = 44,7\%$  a wydłużenie  $A = 61,4\%$ . Dla stali nierdzewnej 0H18N9 maksymalne odkształcenie względne uzyskane w dwóch operacjach zgniatania obrotowego wynosiło  $\varepsilon = 41,9\%$  i  $A = 62,3\%$  a dla stali głębokotłocznej  $\varepsilon = 57,4\%$  i  $A = 109,5\%$ .
8. Chropowatość powierzchni wybranych losowo wytłoczek ze stopu niklu Inconel 625, po trzech operacjach zgniatania obrotowego,

## 2. FINAL CONCLUSIONS

1. *The results of investigation of shaping Inconel 625 nickel alloy by the method of flow forming obtained so far, prove that the alloy is a hard-to-deform material in the processes of metal forming. Due to plastic deformation, products made of the nickel alloy undergo very quick strain hardening.*
2. *An inconvenient phenomenon in forming Inconel 625 products by the methods of metal forming is its springback after the external forces stop acting*
3. *The phenomenon occurs particularly in the process of flow forming where material relocation is effected by means of rolls. In such a process the contact of the forming roll with the material is almost a spot one. This facilitates significant springback of the deformed surface.*
4. *In the process in which significant drawpiece wall thickness is required, application of elongating flow forming is recommended.*
5. *In the final sizing operation, a larger number of forming rolls or balls should be applied.*
6. *Heat treatment prior to the sizing operation reduces or eliminates the phenomenon of the deformed surface springback.*
7. *Maximum true strain of the nickel alloy, obtained in three flow forming operations was  $\varepsilon = 44.7\%$  and elongation  $A = 61.4\%$ . For the 0H18N9 stainless steel, the maximum true strain obtained in two flow forming operations was  $\varepsilon = 41.9\%$  and  $A = 62.3\%$ ; for the deep-drawing steel  $\varepsilon = 57.4\%$  and  $A = 109.5\%$ .*
8. *Surface roughness of random chosen Inconel 625 drawpieces after three flow forming operations was  $R_a = 0.90 - 0.91 \mu\text{m}$  and  $R_t = 3.75 - 4.30 \mu\text{m}$  at the initial material thickness of  $g = 2,3 \text{ mm}$ .*

wynosiła  $R_a = 0,90-0,91 \mu m$  i  $R_t = 3,75-4,30 \mu m$  przy grubości materiału wyjściowego  $g = 2,3 mm$ .

Chropowatość powierzchni wytłoczki wykonanej w dwóch operacjach wynosiła  $R_a = 0,85-1,0 \mu m$  i  $R_t = 4,14-5,04 \mu m$ .

9. Chropowatość powierzchni wytłoczek ze stali nierdzewnej 0H18N9 wykonanych w dwóch operacjach zgniatania obrotowego wynosiła  $R_a = 0,96-1,06 \mu m$  i  $R_t = 4,82-6,80 \mu m$ .
10. Chropowatość wytłoczek ze stali głębokotłocznej DC-04 wykonanych w dwóch operacjach zgniatania obrotowego wynosiła  $R_a = 0,91-1,07 \mu m$  i  $R_t = 6,21-7,60 \mu m$ .
11. Optymalne wyniki w procesie zgniatania obrotowego wydłużającego stopu niklu Inconel 625 i stali nierdzewnej 0H18N9 uzyskano przy zastosowaniu posuwu 350 mm/min i prędkości obrotowej 500 obr/min.
12. W wyniku badań określono optymalną geometrię kształtu rolki roboczej.
13. Wynikami badań procesów zgniatania obrotowego trudno odkształcalnych materiałów zainteresowane są krajowe zakłady związane z przemysłem lotniczym oraz koncerny zagraniczne.
14. Przewiduje się kontynuację badań nowych materiałów, w tym nowych technologii zgniatania obrotowego wydłużającego i rzutowego oraz kształtowania obrotowego z zastosowaniem podgrzewania.

*The roughness of the drawpiece made in two operations was  $R_a = 0.85 - 1.0 \mu m$  and  $R_t = 4.82 - 5.04 \mu m$ .*

9. *The surface roughness of 0H18N9 stainless steel drawpieces made in two operations of flow forming was  $R_a = 0.96 - 1.06 \mu m$  and  $R_t = 6.21 - 7.60 \mu m$ .*
10. *The roughness of the DC-04 deep-drawing steel drawpieces made in two flow forming operations was  $R_a = 0.91 - 1.07 \mu m$  and  $R_t = 6.21 - 7.60 \mu m$ .*
11. *Optimum results of the elongating flow forming of the Inconel 625 alloy and the 0H18N9 stainless steel have been obtained when the travel of 350 mm/min and rotational speed of 500 rpm were applied.*
12. *As a result of the investigation, the optimum geometry of the working roll has been determined.*
13. *The results of the investigation of flow forming of hard-to-deform materials are of interest to Polish enterprises related to the aerospace industry, as well as to foreign concerns.*
14. *Further investigations of new materials, including new technologies of elongating flow forming and shear forming are expected, as well as rotary forming with the application of heating*

## LITERATURA/REFERENCES

- [1] Sprawozdanie końcowe BT 901.45.001.001.003.004. Doskonalenie technologii i konstrukcji maszyn ze sterowaniem komputerowym do wyoblania i zgniatania obrotowego, szczególnie wyrobów długich o złożonych kształtach z wydłużoną poboczną. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 2008 (praca niepublikowana).
- [2] Drenger T., Wiśniewski J., Lisowski J. (i in.): Doskonalenie technologii kształtowania obrotowego wyrobów złożonych. Obróbka Plastyczna Metali 2009 t. XX nr. 2 s. 21-35.
- [3] Sprawozdanie końcowe BT 901.54.001.002.003.004. Badania innowacyjnych technologii tłoczenia, wyoblania, zgniatania obrotowego, szczególnie wyrobów o złożonych kształtach z trudno odkształcalnych i szybko umacniających się materiałów z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 2009 (praca niepublikowana).