

Dr inż. Marek PAWLICKI  
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań  
e-mail: marek.pawlicki@inop.poznan.pl

# Plastyczne kształtowanie miedzi w technologii zgniatania obrotowego

## *Metal forming of copper in flow forming technology*

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki tłoczenia i zgniatania obrotowego wydłużającego współbieżnego wytłoczek z technicznie czystej miedzi. Wyniki twardości wskazują, że technologia zgniatania obrotowego jest bezkonkurencyjną metodą obróbki wytłoczek, pozwalającą realizować wydłużanie ścianki poboczniczy bez międzyoperacyjnej obróbki cieplnej zmiękczającej. Zgniatanie obrotowe, w odróżnieniu od innych metod wyciągania ścianki poboczniczy, nie powoduje istotnego zwiększenia twardości ścianki (wzrostu umocnienia), dzięki czemu po procesie zgniatania możliwe są kolejne operacje kształtowania.

### Abstract

*This article presents the results of drawing and concurrent elongating flow forming of drawpieces made of technically pure copper. Hardness results indicate that flow forming technology is an unrivalled method of working drawpieces that makes it possible to elongate side walls without inter-operational softening heat treatment. Flowforming, in contrast to other methods of side wall elongation, does not cause a significant increase in wall hardness (increase in strengthening), thanks to which further forming operations are possible after the flow forming process.*

**Słowa kluczowe:** zgniatanie obrotowe, miedź, stabilizacja twardości, wzrost odkształcenia

**Keywords:** flow forming, copper, hardness stabilization, increase of strain

## 1. WPROWADZENIE

W Instytucie Obróbki Plastycznej zrealizowano w ostatnich latach różne badania w zakresie kształtowania obrotowego [1-7]. Nadal jednak nie opisano dostatecznie stopnia umocnienia materiału (mierzonego wzrostem jego twardości) na grubości próbki w technologii zgniatania obrotowego.

Obecnie przeważa pogląd, że w obróbce plastycznej wzrost deformacji (np. kolejne wydłużenie ścianki poboczniczy) wpływa na dodatkowe umocnienie materiału (np. w warunkach jednorodnego stanu odkształcania). Znane są jednak procesy technologiczne z silną lokalizacją odkształcenia (np. metody z grupy SPD), w których następuje stabilizacja twardości albo nawet tzw. odkształceniowe mięknięcie (spadek twardości) mimo wzrostu skumulowanej deformacji [8-10].

## 1. INTRODUCTION

*In recent years, various studies in the scope of flow forming have been conducted at the Metal Forming Institute [1-7]. However, the degree of material strengthening (measured by the increase in its hardness) for sample thicknesses in flow forming have still not been described satisfactorily.*

*Currently, the predominant opinion is that an increase in deformation in plastic working (e.g. successive elongations of side walls) causes additional material strengthening (e.g. under conditions of a homogenous strain state). However, technological processes with strong local strain are known (e.g. methods from the SPD group), in which hardness is stabilized or so-called strain softening (drop in hardness) takes place despite the increase of accumulated strain [8-10].*

Podobnie, jak w metodach SPD, w zgniataniu obrotowym wytłoczek następuje silna lokalizacja odkształcenia [1]. Technologia zgniatania obrotowego wydłużającego współbieżnego jest jednak, w odróżnieniu od metod SPD, rozpowszechnioną technologią znajdującą liczne zastosowania przemysłowe (głównie w przemyśle wojskowym, lotniczym i budowy maszyn).

Znane są różne metody wydłużania ścianki poboczniczy wytłoczek cylindrycznych. Wśród najbardziej popularnych warto wymienić wyciąganie i zgniatanie obrotowe wydłużające współbieżne. Technologia zgniatania obrotowego blach jest konkurencyjna, w stosunku do metody wyciągania ścianki, w zakresie możliwych odkształceń w jednej operacji. W odróżnieniu od wyciągania, pozwala jednak na znacznie większe odkształcenia (pocienienia ścianki wytłoczki) w kolejnych operacjach, bez obróbki cieplnej zmiękczającej.

Celem rozpoznawczych badań opisanych w tym artykule było określenie, czy skutek zgniatania obrotowego następuje stabilizacja twardości ścianki (w stosunku do poprzedzającego go tłoczenia) i czy kolejno następujące po sobie operacje zgniatania powodują widoczne umocnienie materiału w postaci wyższej twardości.

Poszukiwano w ten sposób odpowiedzi na pytanie, jaka jest zasadnicza różnica w metodach kształtowania z grupy tłoczenia (np. w wyciąganiu) a metodach kształtowania obrotowego.

## 2. METODYKA BADAŃ

Przeprowadzono operacje tłoczenia wytłoczek cylindrycznych na prasie PHYE-250 (rys. 1) z zamontowanym tłoczniakiem badawczym i poduszką hydrauliczną, które były następnie zgniatane obrotowo wydłużająco współbieżnie na zgniatarce obrotowej MZH-400 (rys. 2).

Do badań wybrano materiał w postaci jednofazowego metalu – technicznie czystej miedzi wg normy PN-EN 1977. Wymiary krążków wyjściowych zestawiono w tabeli 1.

*Similarly as in SPD methods, strong strain localization takes place during flow forming of drawpieces [1]. Concurrent elongating flow forming is, however, in contrast to SPD methods, a widely propagated technology finding numerous industrial applications (mainly in armaments, aeronautics, and mechanical engineering).*

*Various methods for elongating the side walls of cylindrical drawpieces are known. Among the most popular ones, it is worth distinguishing fullering and concurrent elongating flow forming. Sheet flow forming technology is a competitor to the wall elongation method in terms of the strains possible to achieve in one operation. In contrast to fullering, however, it makes it possible to achieve significantly greater strains (thinning of the drawpiece wall) in successive operations without soft annealing heat treatment.*

*The purpose of the exploratory studies described in this article was to determine whether wall hardness is stabilized as a result of flow forming (relative to the drawing preceding it) and whether successive flow forming operations cause visible material strengthening in the form of greater hardness.*

*In this way, an answer was sought to the question of what the principal difference is between drawing methods (e.g. fullering) and flow forming methods.*

## 2. METHODOLOGY OF STUDIES

*The drawing operation was performed on cylindrical drawpieces on a PHYE-250 press (fig. 1) with an installed testing die and hydraulic pad, which were subsequently subjected to concurrent elongation flow forming on an MZH-400 roll former (fig. 2).*

*A material in the form of a single-phase metal - technically pure copper according to standard PN-EN 1977 – was selected for studies. The dimensions of initial disks are shown in table 1.*

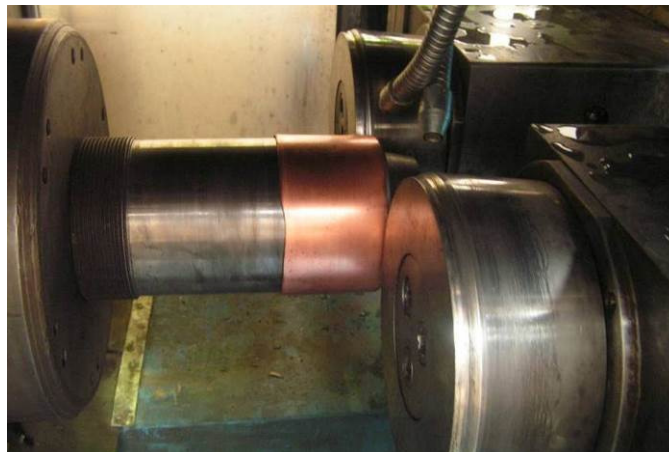
Tabela 1. Wymiary geometryczne krążków wyjściowych  
 Table 1. Geometrical dimensions of initial disks

Nr próbki Sample No.	Średnica $\varnothing$ zew. [mm] Exterior $\varnothing$ diameter [mm]
1	193 <sup>+0,1</sup>
2	195 <sub>-0,05</sub>
3	196 $\pm$ 0,05



Rys. 1. Tłocznik badawczy do tłoczenia wyłoczek cylindrycznych zamontowany na prasie PHYE-250; a) z widocznym krążkiem wyjściowym do prób tłoczenia założonym na pierścieniu dociskowym, b) z widoczną wytłoczką cylindryczną po operacji tłoczenia

*Fig. 1. Testing die for drawing of cylindrical drawpieces, installed on a PHYE-250 press; a) with a visible initial disk for drawing tests mounted on the pressure ring, b) with visible cylindrical drawpiece after the drawing operation*



Rys. 2. Widok ogólny narzędzi kształtujących zgniatarki obrotowej MZH-400 z widoczną założoną na wzorniku wytłoczką cylindryczną po pierwszej operacji zgniatania obrotowego

*Fig. 2. General view of forming tools of the MZH-400 roll former with a visible cylindrical drawpiece mounted on the template after the first flow forming operation*

Operację tłoczenia bez pocienienia ścianki zrealizowano przy zmiennym nacisku dociskacza (poduszki hydraulicznej) oraz zmiennej sile tłoczenia [1]. Wynikało to ze specyfiki układów hydraulicznych – prasy i zasilacza hydraulicznego poduszki dociskacza, a także niedokładności układów hydraulicznych i sterowania ciśnieniem tłoka.

Przyjęto stałe parametry procesu zgniataania obrotowego wydłużającego współbieżnego: obroty – 500 [1/min], prędkość posuwu – 400 [mm/min] [1-7]. Podczas operacji zgniataania obrotowego wytłoczki i narzędzia chłodzono chłodziwem – mieszaniną emulsji typu antol i wody w stosunku 1:10. Zastosowano chłodzenie, aby proces był jak najbliższy procesowi adiabatycznemu.

Średnice wewnętrzne wytłoczek mierzono przy dnie, przy przejściu promienia w pobocznicy, w 1/4, 2/4, 3/4 wysokości ścianki pobocznicy i przy krawędzi wytłoczek. Wyniki uśredniono.

W przypadku pomiaru średnicy wewnętrznej w strefie dna podano wyniki pomiaru bezpośrednio przy ścianie dna wytłoczki (przy styku dna ze strefą promienia wytłoczki). Średnice zewnętrzne wytłoczek mierzono dokładnie na takich samych wysokościach ścianki pobocznicy jak wewnętrzne. Również te wyniki uśredniono.

Dla wytłoczek wykonanych z krążków nr 1 i 2 zaplanowano jedną operację zgniataania obrotowego. Z tym, że dla wytłoczki nr 2 zaplanowano obróbkę jedynie części ścianki pobocznicy i tym samym pozostawienie strefy wytłoczzonej, przejściowej (strefa styku rolki z materiałem wytłoczki) i zgniecionej obrotowo (rys. 5). Dla wytłoczki nr 3 zaplanowano dwie następujące po sobie operacje zgniataania obrotowego bez międzyoperacyjnej obróbki cieplnej zmiękczającej (wyżarzania).

Zaplanowano 2 warianty pomiarów twardości: wzdłuż próbek pobranych z materiału wyjściowego i pobocznicy wytłoczek oraz w poprzek próbek (identyfikując zmiany twardości na grubości próbek) [12-13]. Dla próbek 1-3 wykonano zgłady wzdłużne ścianki pobocznicy, a z blachy wyjściowej – 0 – pobrano próbkę w jednym kierunku – równoległym do krawędzi rozkroju blachy – 0° [12-13].

*A drawing operation without wall thinning was performed at variable pad force (hydraulic pad) and variable drawing force [1]. This resulted from the nature of hydraulic systems – the press and hydraulic feed mechanism of the pressure pad - as well as from inaccuracies of hydraulic systems and of die pressure control.*

*Constant parameters of the concurrent elongation flow forming process were accepted: rotations – 500 [1/min], advance rate – 400 [mm/min] [1-7]. During the flow forming operation, drawpieces and tools were cooled with a mixture of an antol emulsion and water in the proportion of 1:10. Cooling was implemented so that the process could be as similar to the adiabatic process as possible.*

*The interior diameters of drawpieces were measured at the bottom, where the radius transitions into the side wall, at 1/4, 2/4, 3/4 of the height of the side wall, and near the edge of drawpieces. Results were averaged.*

*In the case of measurement of the interior diameter in the bottom area, results of measurement directly near the wall of the bottom of the drawpiece were given (at the point of contact of the bottom with the radial area of the drawpiece). Exterior diameters of drawpieces were measured at exactly the same heights of the side walls as interior diameters were. These results were also averaged.*

*A single flow forming operation was planned for drawpieces made from disks No. 1 and 2. However, working of only part of the side wall was planned for drawpiece No. 2, so that there would be a pressed area, transition area (area of contact of the roller with the drawpiece material) and roll formed area (fig. 5). For drawpiece No. 3, two successive flow forming operations were planned without inter-operational soft annealing heat treatment.*

*2 variants of hardness measurements were planned: along samples acquired from the initial material and drawpiece side walls across samples (with identification of hardness changes at sample thicknesses) [12-13]. For samples 1-3, longitudinal metallographic specimens of the side wall were made, and a sample was acquired from the initial sheet – 0 – in one direction, parallel to the edge of sheet cutting - 0° [12-13].*

Zgłady przed pomiarem twardości trawiono uniwersalnym odczynnikiem do miedzi, mosiądzów i brązów ( $100\text{ cm}^3$  wody,  $10\text{ cm}^3$  HCl,  $5\text{ g FeCl}_3$ ). Mikrotwardość badano za pomocą twardościomierza Micromet 2104 – Buehler, obciążenie  $0,5\text{ N}$  [12-13].

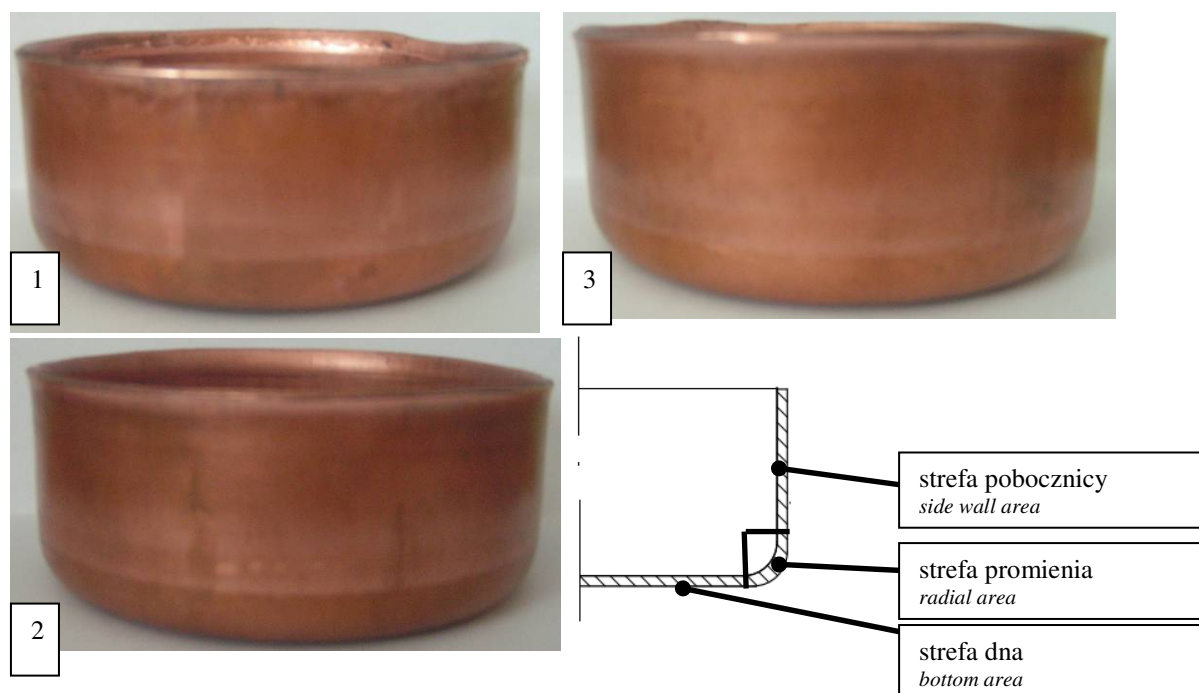
W wariacie pomiarów twardości wzdłuż próbki, na próbce 0 (materiał wyjściowy) mikrotwardość mierzono wzdłuż próbki na środku przekroju, natomiast na próbkach 1, 2 oraz 3 w odległości  $0,12\text{ mm}$  od powierzchni zewnętrznej wytłoczek. W próbkach 0, 1 i 3 odległości między odciskami wyniosły 2 grubości blachy wyjściowej ( $2 \times 2,54\text{ mm}$ ).

W badaniach twardości w poprzek próbek kolejne odciski zaplanowano w odległości  $0,15\text{ mm}$ , natomiast odległość między ścieżkami dla próbek 1 i 3 wyniosła  $5\text{ mm}$ . W próbce 0 zbadano jedną ścieżkę mikrotwardości, a w próbce 2 po jednej w każdej z charakterystycznych stref (tłoczonej, przejściowej i zgniecionej obrotowo).

*Before hardness measurement, specimens were etched with a universal reagent for copper, brass, and bronze ( $100\text{ cm}^3$  of water,  $10\text{ cm}^3$  HCl,  $5\text{ g FeCl}_3$ ). Microhardness was tested using a Micromet 2104 – Buehler hardness tester with a load of  $0.5\text{ N}$  [12-13].*

*In the hardness measurement variant along the sample, microhardness was measured for sample 0 (initial material) along the sample in the middle of the cross-section, and for samples 1, 2, and 3, at a distance of  $0.12\text{ mm}$  from the exterior surface of the drawpieces. In samples 0, 1, and 3, the distances between indentations were equal to 2 thicknesses of the initial sheet ( $2 \times 2.54\text{ mm}$ ).*

*In transverse hardness measurements of samples, successive indentations were planned at a distance of  $0.15\text{ mm}$ , however the distance between tracks for samples 1 and 3 was equal to  $5\text{ mm}$ . One microhardness track was tested in sample 0, and in sample 2, one track for each characteristic area was tested (press formed, transition, and roll formed).*



Rys. 3. Wytłoczki cylindryczne i schemat podziału na strefy  
 Fig. 3. Cylindrical drawpieces and the diagram of their division into areas

Dla pomiarów na grubości ścianki wytłoczki zrealizowano badania twardości zarówno HV 0,5, jak i HV 1,0 celem wykluczenia wpływu udziału procentowego powierzchni ziaren na twardość materiału (w związku z zakładaną różnicą twardości na granicach i wewnątrz ziarna – różnej wielkości odciski obejmują różną liczbę ziaren i ich granic).

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1 Badania tłoczenia

Zrealizowano operację tłoczenia wytłoczek cylindrycznych wg opisu zawartego w metodycie. Zmierzone parametry procesu tłoczenia zebrano w tabeli 2. Jako środek smarny stosowano parafinol [11]. Konstrukcja układów hydraulicznych zespołu dociskacza i prasy nie pozwalała na zadanie stałej siły tłoczenia i docisku dociskacza. Można było nastawić ją jedynie z pewnym przybliżeniem (stąd wahania obu sił w procesie tłoczenia). Oczywiście wpływało to na kształt i wymiary otrzymanych wytłoczek.

Wytłoczki zmierzono; wyniki grubości ścianki, wysokości ścianki poboczniczy oraz średnicy zewnętrznej i wewnętrznej zestawiono w tabeli 3. Tak uzyskane wytłoczki pokazano na rys. 3. Obliczony współczynnik wytłaczania wyniósł 0,64 [1]. Na rys. 4 pokazano wykres średniej grubości ścianki wytłoczek dla poszczególnych stref.

Każda ze stref odznacza się zróżnicowaną grubością ścianki. Zasadniczo można jednak wnioskować o najmniejszej grubości w strefie promieniowej wytłoczki oraz o stosunkowo zmiennej (rosnącej w stronę krawędzi ścianki) grubości poboczniczy.

*For measurements on the thickness of the drawpiece wall, hardness measurements were performed for HV 0.5 and for HV 1.0 in order to eliminate the influence of the percentage fraction of grain surfaces on material hardness (in relation to the assumed difference of hardness on grain boundaries and in grains - indents with different sizes encompass a different number of grains and their boundaries).*

### 3. TEST RESULTS

#### 3.1. Drawing tests

*A drawing operation was performed on cylindrical drawpieces according to the description contained in the methodology. Measured parameters of the drawing process have been listed in table 2. Paraffinol was used as a lubricant [11]. The design of the hydraulic systems of the pressure pad and press unit did not allow for the setting of a constant drawing force and pad force. The force could only be set with a certain approximation (and thus, both forces were subject to oscillation during the drawing process). Of course, this had an influence on the shape and dimensions of obtained drawpieces.*

*Drawpieces were measured; results of wall thickness, side wall height, and exterior and interior diameter have been presented in table 3. Drawpieces obtained in this way are shown on fig. 3. The calculated drawing coefficient was equal to 0.64 [1]. Fig. 4 shows a chart of average drawpiece wall thickness for individual areas.*

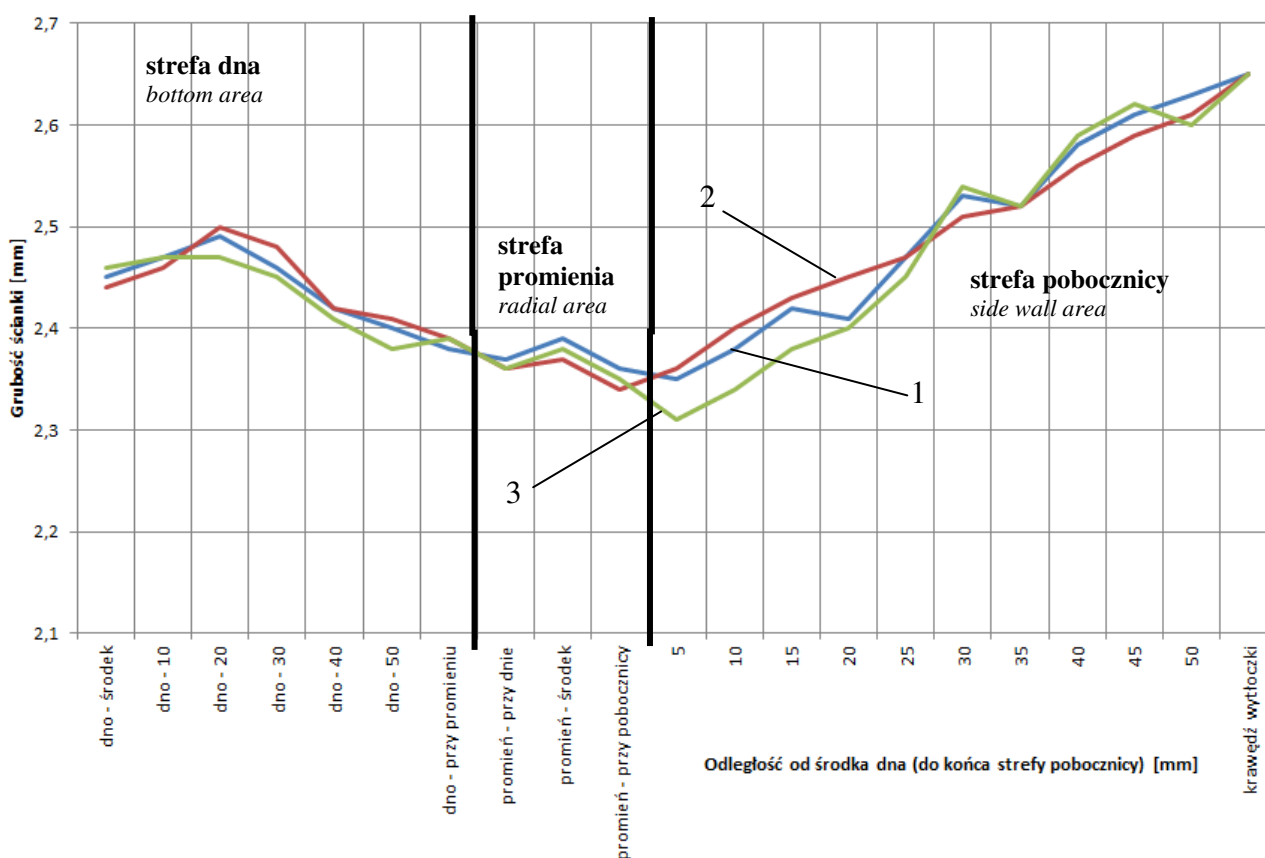
*Each area is distinguished by a different wall thickness. In principle, however, it can be inferred that the smallest thickness is in the radial area of the drawpiece and that there is a relatively varying side wall thickness (rising in the direction of the edge of the wall).*

Tabela 2. Parametry operacji tłoczenia wytłoczek cylindrycznych  
Table 2. Parameters of the drawing operation on cylindrical drawpieces

Nr próbki Sample No.	Siła tłoczenia [kN] Drawing force [kN]	Siła dociskacza [kN] Pad force [kN]
1	120-220	95-96
2	120-230	94-96
3	130-220	95-96

Tabela 3. Średnie wymiary geometryczne wytłoczek cylindrycznych  
 Table 3. Average geometrical dimensions of cylindrical drawpieces

Nr próbki i strefa Sample No. and area		Średnica Ø zew. [mm] (średnia) Exterior diameter Ø [mm] (average)	Grubość ścianki [mm] (średnia) Wall thickness [mm] (average)	Wysokość ścianki [mm] min-max (po obwodzie) Wall height [mm] min-max (on circumference)	Średnica Ø wew. [mm] (średnia) Interior diameter Ø [mm] (average)
1	strefa dna bottom area	124,44	2,44	49,50-53,20	119,44
	strefa promienia radial area	125,09	2,37		120,33
	strefa poboczniczy side wall area	125,17	2,48		120,15
2	strefa dna bottom area	124,15	2,44	51,60-54,00	119,22
	strefa promienia radial area	124,86	2,36		120,17
	strefa poboczniczy side wall area	125,07	2,48		120,08
3	strefa dna bottom area	124,28	2,43	51,70-54,17	119,42
	strefa promienia radial area	124,79	2,36		120,06
	strefa poboczniczy side wall area	124,99	2,46		120,05



1 – wytłoczka 1 (drawpiece 1); 2 – wytłoczka 2 (drawpiece 2); 3 – wytłoczka 3 (drawpiece 3)

Rys. 4. Wykres grubości ścianki [mm] dla poszczególnych stref (pokazanych na rys. 3) w funkcji odległości od dna wytłoczek [mm]

Fig. 4. Chart of wall thickness [mm] for individual area (shown in fig. 3) as a function of distance from the bottom of drawpieces [mm]

Jak wynika z rys. 4, grubość dna maleje w stronę promienia, a grubość pobocznic rośnie w stronę krawędzi wytłoczek.

Tendencja w rozkładzie średnicy wytłoczki cylindrycznej jest taka, że zarówno średnica zewnętrzna, jak i wewnętrzna rośnie od dna do krawędzi pobocznic (jest to związane ze zjawiskiem sprężynowania powrotnego materiału – tzw. puchnięcie wytłoczki).

### 3.2. Badania zgniatania obrotowego

W tabeli 4 zebrano wymiary wytłoczek po zgniataniu obrotowym. Na rys. 5 pokazano uzyskane wytłoczki. Wycięto z nich próbki do badań mikrotwardości. Próbki te pobrano wzdłuż pobocznic wytłoczek. Na rys. 6 pokazano wykres grubości ścianki dla poszczególnych stref (pokazanych na rys. 3) w stosunku odległości od środka dna wytłoczek.

As results from fig. 4, the thickness of the bottom decreases in the direction of the radius, and the side wall thickness increases in the direction of the edge of drawpieces.

There is a tendency in the distribution of the diameter of the cylindrical drawpiece, that both the interior and exterior diameters increase from the bottom to the edge of the side wall (this is related to the material spring-back phenomenon – so-called swelling of the drawpiece).

### 3.2. Flow forming tests

Table 4 lists the dimensions of drawpieces after flow forming. Fig. 5 shows obtained drawpieces. Samples for microhardness tests were cut out from them. These samples were acquired from along the side wall of drawpieces. Fig. 6 shows a chart of wall thickness of individual areas (shown in fig. 3) relative to the distances from the center of the bottom of drawpieces.

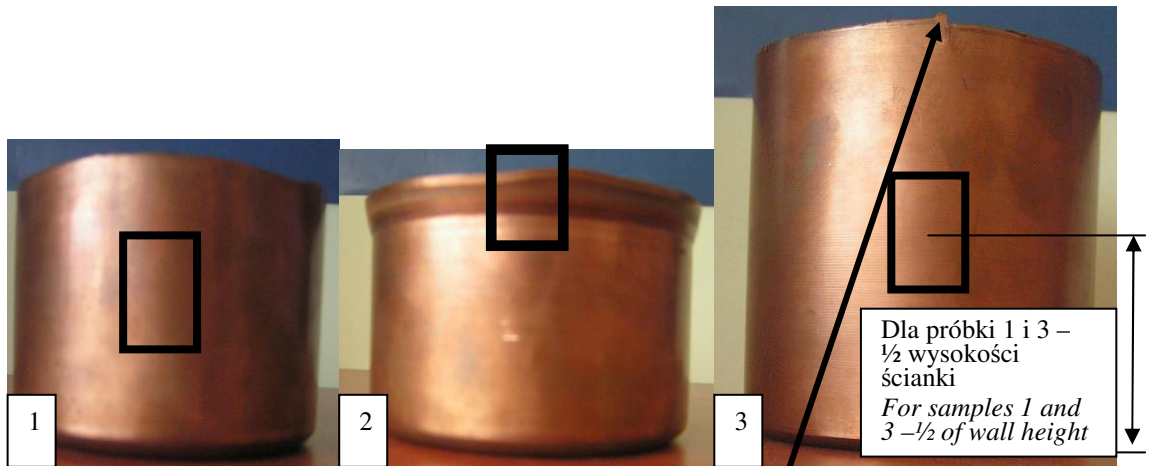
Tabela 4. Wymiary geometryczne wytłoczek zgniecionych obrotowo  
Table 4. Geometrical dimensions of roll formed drawpieces

Nr próbki i strefa Sample No. and area		Średnica Øzew. [mm] (średnia) Exterior diameter Ø [mm] (average)	Grubość ścianki [mm] (średnia) Wall thickness [mm] (average)	Uzyskany stopień zgniotu ścianki pobocznic [%] Obtained degree of cold work of the side wall [%]	Wysokość ścianki min-max [mm] Wall height min-max [mm]	Średnica Øwew. [mm] (średnia) Interior diameter Ø [mm] (average)
1	strefa dna bottom area	122,67	2,44	-	77,60-81,20	118,50
	strefa promienia radial area	123,82	2,05	-		119,15
	strefa pobocznic side wall area	124,65	1,59	41,10		121,40
2	strefa dna bottom area	122,22	2,44	-	72,30-76,40	118,35
	strefa promienia radial area	123,94	2,04	-		120,00
	strefa pobocznic side wall area	125,15	1,69	31,85		120,85
3	strefa dna bottom area	121,50	2,43	-	120,70-125,40	116,55
	strefa promienia radial area	122,90	1,97	-		120,20
	strefa pobocznic side wall area	124,50	1,02	61,90		121,65

Uwaga: Pomiarów dokonano analogicznie jak dla wytłoczek tłoczonych – tabela 3.

Note: Measurements were performed analogously as for press drawn drawpieces - table 3.



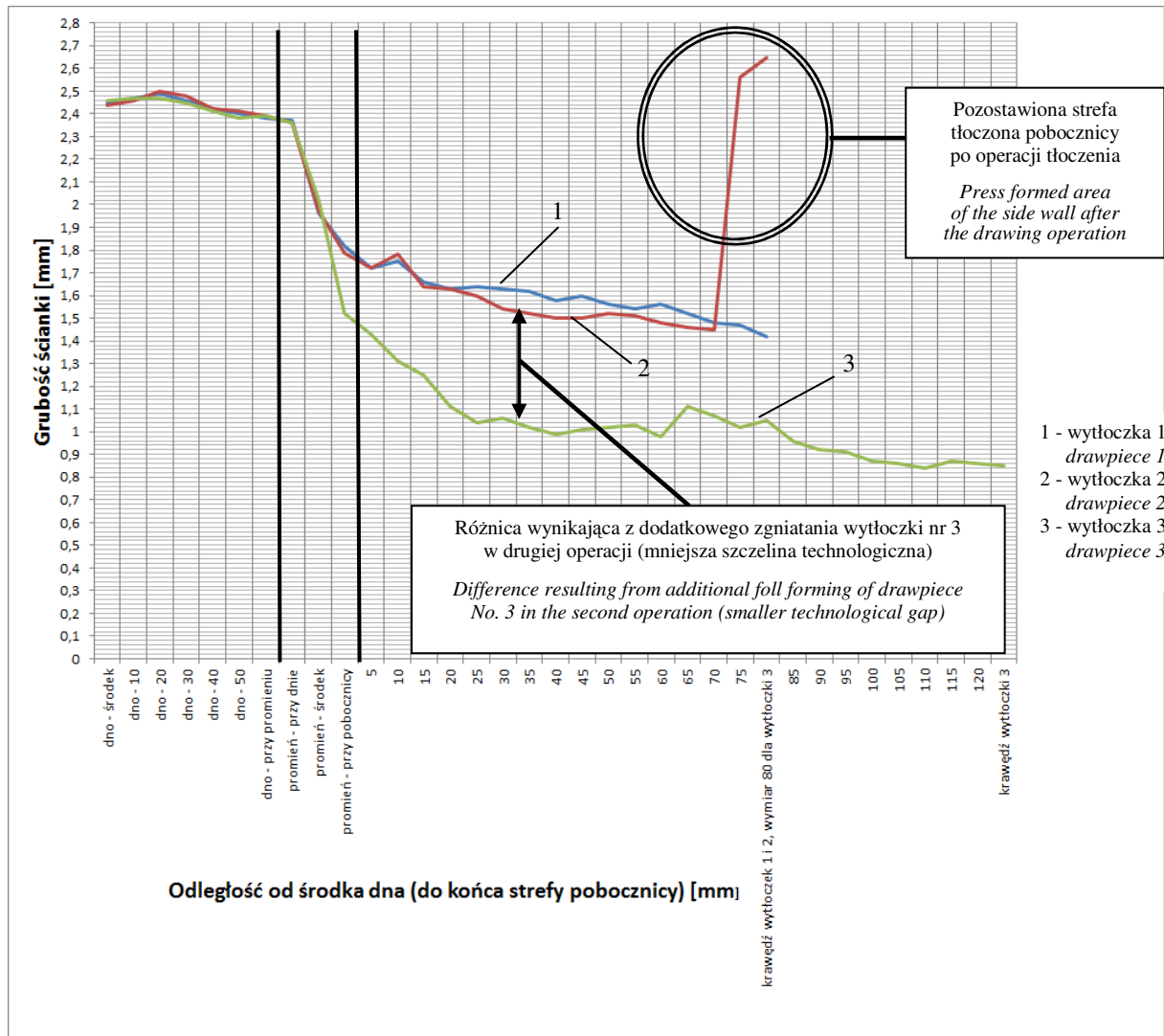


Rys. 5. Wytłoczki zgniecione obrotowo; próbka 3 z widocznymi pęknięciami i wadami makroskopowymi (dla każdej z próbek zaznaczono miejsce pobrania próbek do badań mikrotwardości)

Fig. 5. Roll formed drawpieces; sample 3 with visible cracks and macroscopic defects (for each sample, the place of sample acquisition for microhardness tests has been marked)

Uwaga do rys. 5 próbka 2 (zaznaczona czerwoną obwódką) posiada strefę tłoczoną, przejściową i zgniecioną obrotowo – jak na rys. 9 i 10.

Not to fig. 5 –sample 2 (marked with a red fringe) has a drawn, transition, and roll formed area - as in fig. 9 and 10.



Rys. 6. Wykres grubości ścianki [mm] dla poszczególnych stref (pokazanych na rys. 3) w funkcji odległości od dna wytłoczek zgniatanych obrotowo [mm]

Fig. 6. Chart of wall thickness [mm] for individual areas (shown on fig. 3) as a function of the distance from the bottom of roll formed drawpieces [mm]

Obserwacje makroskopowe wykazały pęknięcia ścianki poboczniczy wylóczki nr 3. Tym samym potwierdzono, że dla wylóczki z tego materiału i uzyskanego stopnia zgniotu, bez międzyoperacyjnej obróbki cieplnej nie jest możliwe przeprowadzenie prawidłowo kolejnej (trzeciej) operacji zgniatania obrotowego (przy zadanych w eksperymencie parametrach kształtowania).

Należy zwrócić uwagę, że wyniki dla wylóczki nr 3 dotyczą drugiej operacji zgniatania obrotowego. Pierwsza operacja dla próbki 3 – parametry obróbkowe zadano identyczne jak dla próbki 2. Ustawiona szczelina technologiczna dla pierwszej operacji wynosiła 1,6 mm, a dla drugiej 1 mm.

Jak wynika z wykresu, grubość ścianki poboczniczy wylóczki zgniecionej obrotowo nie jest stała na całej swojej długości. Zadanie jednej szczeliny technologicznej daje w rezultacie różne, aczkolwiek zbliżone, wyniki grubości ścianki poszczególnych wylóczek.

Wynika to zarówno z rozrzutu grubości ścianki po tłoczeniu, jak również z drgań w procesie zgniatania (zazwyczaj zgniatarka nie jest na tyle sztywna, by zagwarantować pełną stałość wymiaru szczeliny technologicznej).

### 3.3. Badania mikrotwardości

Na rys. 7 i 8 przedstawiono schematy lokalizacji odcisków mikrotwardości HV 0,5 dla próbek 0 i 1. Schemat dla próbki 3 był analogiczny jak dla próbki 1.

Na rys. 9 pokazano schemat podziału dla próbki 2.

Pomiary wykonano w stałych odległościach w każdej ze stref, na każdej próbce. Na rys. 10 pokazano lokalizację odcisków twardości HV 0,5 w próbce 2.

*Macroscopic observations showed cracks in the side wall of drawpiece No. 3. At the same time, it was confirmed that for the drawpiece made from this material and the obtained degree of cold work, without inter-operational heat treatment, it is impossible to correctly perform another (third) flow forming operation (for the forming parameters set in the experiment).*

*It should be noted that the results for drawpiece No. 3 concern the second flow forming operation. In the first operation for sample 3, working parameters were identical as for sample 2. The set technological gap for the first operation was 1.6 mm, and for the second, 1 mm.*

*As results from the chart, the thickness of the side wall of a roll formed drawpiece is not constant over its entire length. The setting of a single technological gap gives different, but similar, results of wall thicknesses of individual drawpieces.*

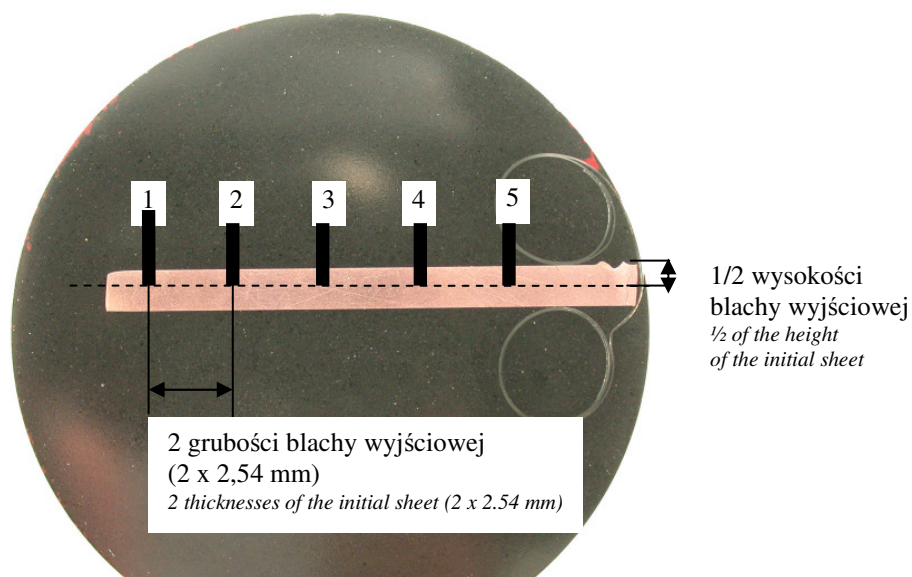
*This results both from the dispersion of wall thickness after drawing and from vibrations during the flowforming process (usually, the flowforming machine is not rigid enough to guarantee full constancy of the technological gap).*

### 3.3. Microhardness tests

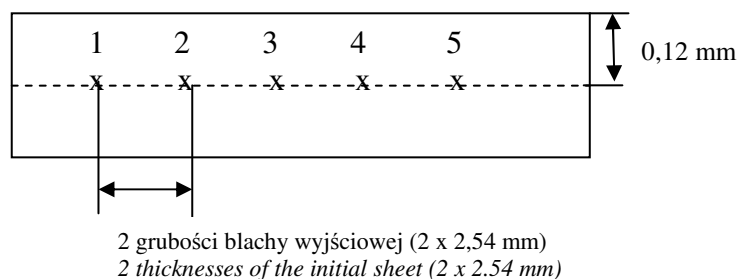
*Fig. 7 and 8 show diagrams of the locations of HV 0.5 microhardness indentations for samples 0 and 1. The diagram for sample 3 is analogous to that for sample 1.*

*Fig. 9 shows the diagram of division for sample 2.*

*Measurements were conducted at constant distances in each of the areas, for every sample. Fig. 10 shows the locations of HV 0.5 hardness indentations in sample 2.*

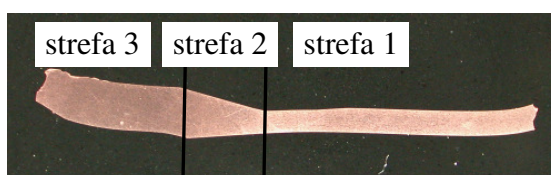


Rys. 7. Schematy lokalizacji odcisków mikrotwardości HV 0,5 dla próbki 0  
 Fig. 7. Diagrams of locations of HV 0.5 microhardness indentations for sample 0



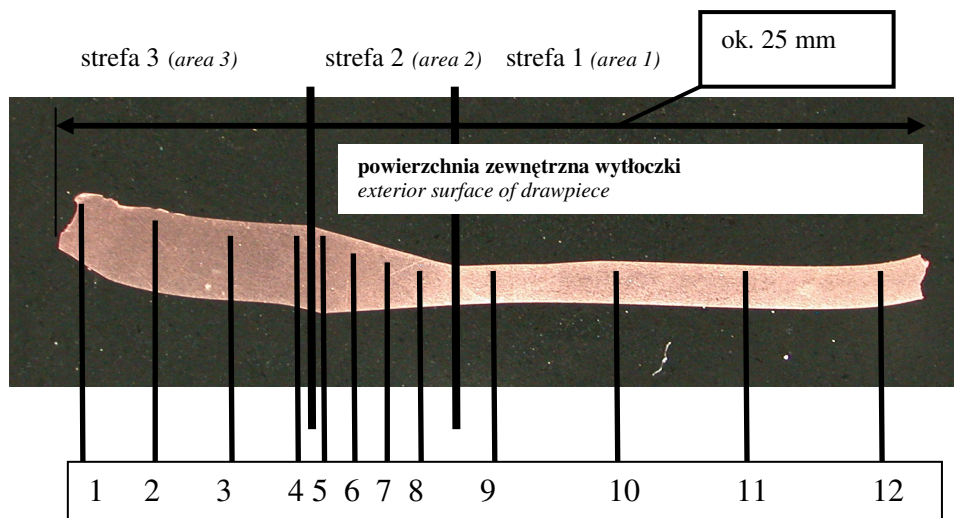
Rys. 8. Schematy lokalizacji odcisków mikrotwardości HV 0,5 dla próbki 1 (lokalizacja odcisków próbki 3 jest analogiczna)

Fig. 8. Diagrams of locations of HV 0.5 microhardness indentations for sample 1 (the locations of the indentations of sample 3 are analogous)



Rys. 9. Schemat podziału dla próbki 2, gdzie strefa 1 – strefa zgnieciona obrotowo, strefa 2 – strefa przylegająca do rolki kształtującej, strefa 3 – strefa tłoczona

Fig. 9. Diagram of division for sample 2, where area 1 – the roll formed area, area 2 – area adjoining the forming roller, area 3 – press drawn area



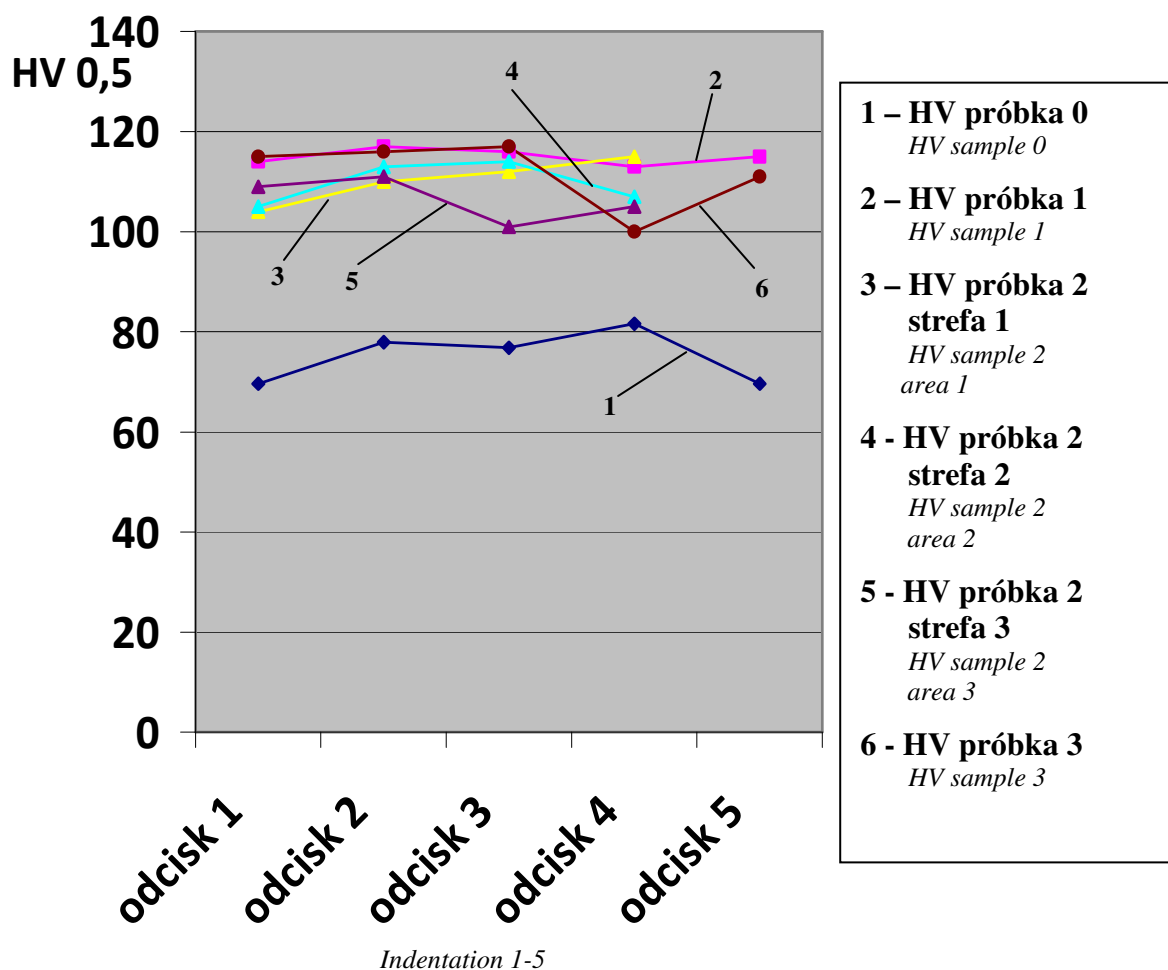
Rys. 10. Lokalizacja odcisków twardości HV 0,5 w próbce 2; odległość od powierzchni zewnętrznej wytłoczki wynosi 0,12 mm

Fig. 10. Locations of HV 0.5 hardness indentations in sample 2; the distance from the exterior surface of the drawpiece is equal to 0.12 mm

Tabela 5. Wyniki pomiarów mikrotwardości HV 0,5 badanych próbek – pomiar wzdłużny

Table 5. Results of HV 0.5 microhardness measurements on the studied samples – longitudinal measurement

Nr próbki Sample No.	Nr pomiaru Measurement No.	Mikrotwardość HV 0,5 HV 0.5 microhardness	Nr na schemacie – rys. 10 No. on diagram – fig. 10	Średnia HV 0,5 Average HV 0.5
materiał wyjściowy initial material	1	69,6	-	75
	2	77,9	-	
	3	76,8	-	
	4	81,6	-	
	5	69,6	-	
1 (jedna operacja zgniatania obrotowego) 1 (one flow forming operation)	1	114	-	115
	2	117	-	
	3	116	-	
	4	113	-	
	5	115	-	
2 strefa 3 2 area 3	1	109	1	107
	2	111	2	
	3	101	3	
	4	105	4	
2 strefa 2 2 area 2	1	105	5	110
	2	113	6	
	3	114	7	
	4	107	8	
2 strefa 1 2 area 1	1	104	9	110
	2	110	10	
	3	112	11	
	4	115	12	
3 (dwie operacje zgniatania obrotowego) 3 (two flow forming operations)	1	115	-	112
	2	116	-	
	3	117	-	
	4	100	-	
	5	111	-	



Rys. 11. Wyniki mikrotwardości HV 0,5 próbek 0-3

Fig. 11. Results of HV 0.5 microhardness, samples 0-3

Mikrotwardość wyjściowa miedzi wynosiła około 75 HV 0,5. Wraz ze wzrostem odkształcenia mikrotwardość ścianki pobocznic próbek rosła aż do 100-117 HV 0,5 – rys. 11.

Z wyników mikrotwardości HV 0,5 wynika, że blacha w stanie handlowym była wyżarzona rekrytalizująco (tzw. w handlu stan miękkiej).

Na rys. 12-16 pokazano wyniki mikrotwardości HV 0,5 i HV 0,1 próbek w poprzek grubości oraz przykładowe ścieżki mikrotwardości. W tabeli 6 porównano wyniki mikrotwardości HV 0,5 i HV 1 badanych próbek.

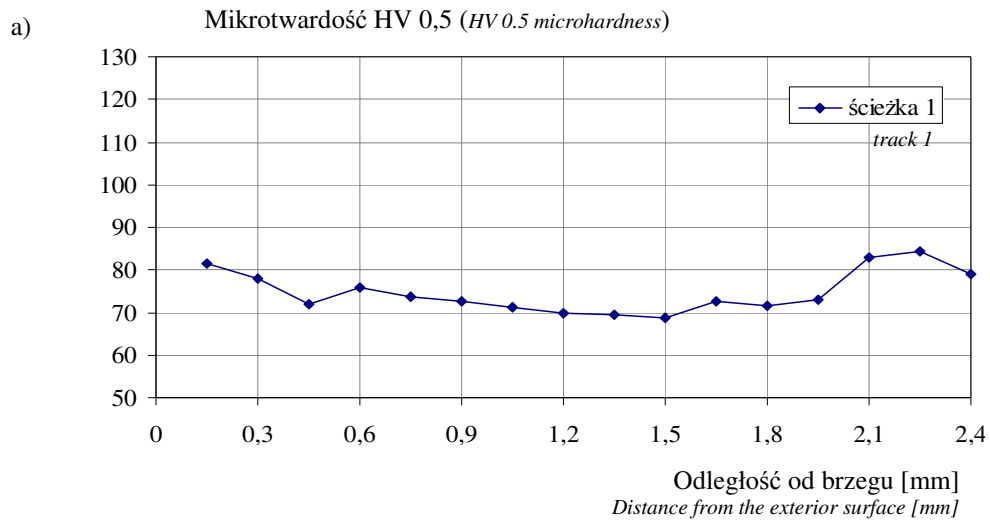
Analogicznie do poprzednio przedstawionych próbek, również dla próbki 2 wyniki mikrotwardości na grubości próbki są zbliżone do mikrotwardości mierzonej wzdłuż próbki (rys. 14).

The initial microhardness of copper was equal to approx. 75 HV 0.5. As strain increased, the microhardness of the side wall of samples increased up to 100-117 HV 0.5 - fig. 11.

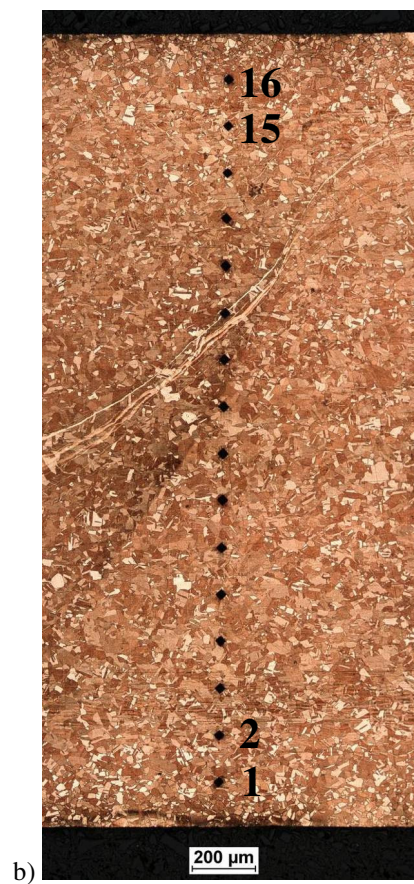
It results from HV 0.5 microhardness results, that the sheet in a commercial state was recrystallization annealed (in the trade, so-called soft state).

Fig. 12-16 show results of HV 0.5 and HV 0.1 microhardness of samples measured transverse to thickness as well as exemplary microhardness tracks. Table 6 compares the results of HV 0.5 and HV 1 microhardnesses of studied samples.

Analogously to the previously presented samples, for sample 2, results of microhardness on sample thickness are also similar to the microhardness measured along the sample (fig. 14).

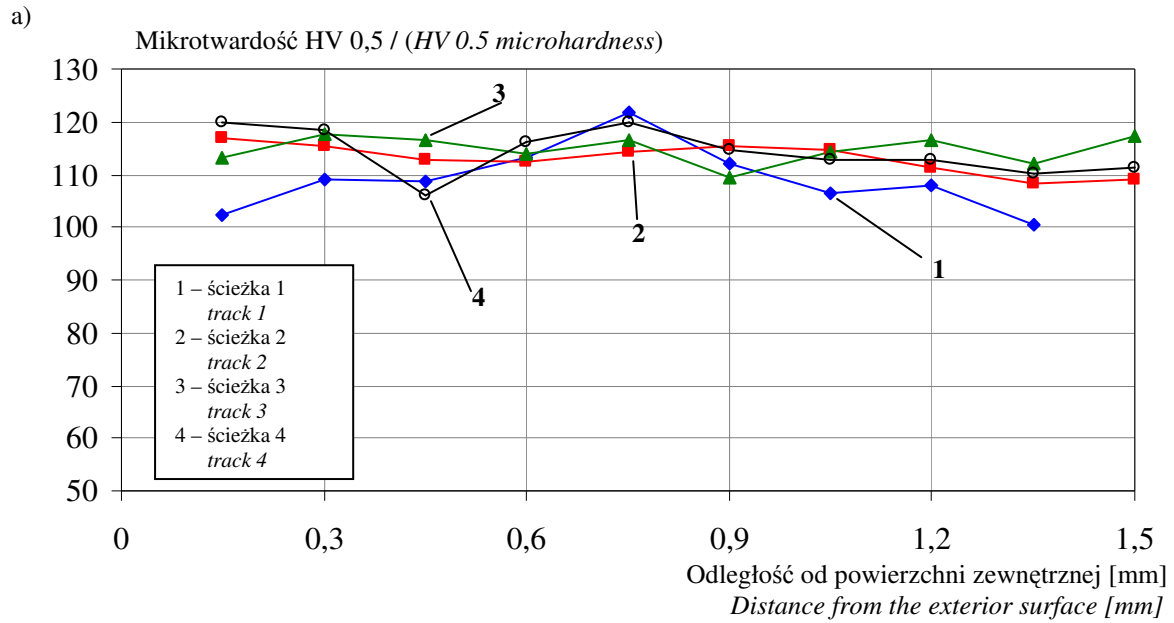


b)

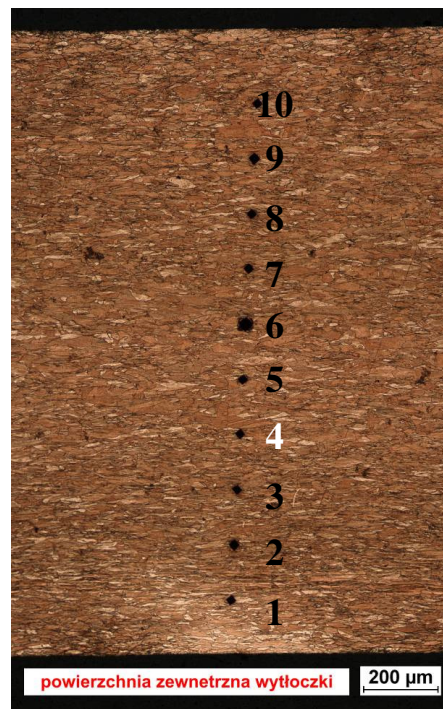


Rys. 12. Rozkład mikrotwardości HV 0,5 na grubości próbki 0 (a) oraz ścieżka mikrotwardości (b);  
wyniki zbliżone do wyników twardości wzdłuż próbki z rys. 11

*Fig. 12. Distribution of HV 0.5 microhardness on the thickness of sample 0 (a) and microhardness track (b);  
results similar to the hardness results along the sample in fig. 11*

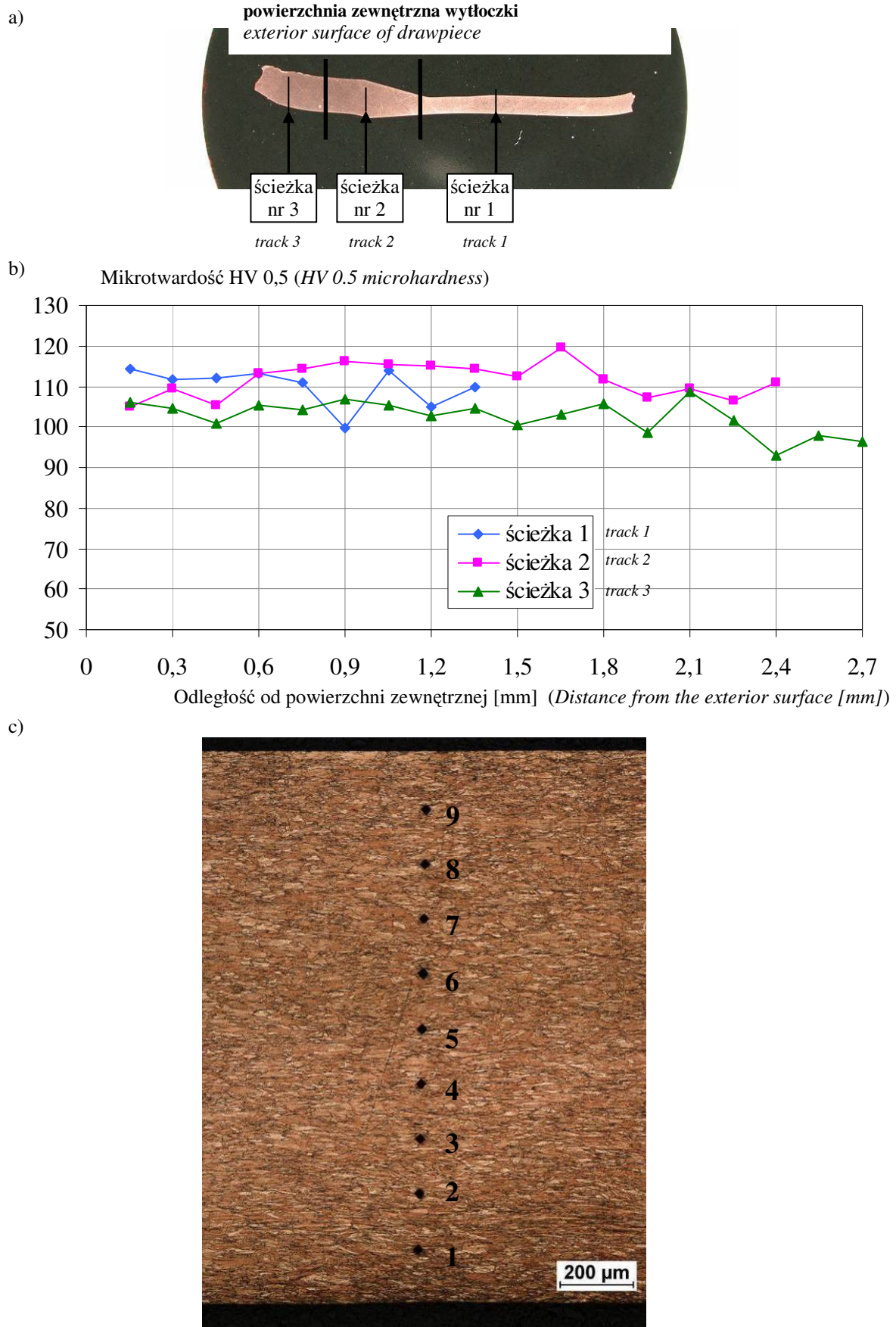


b)



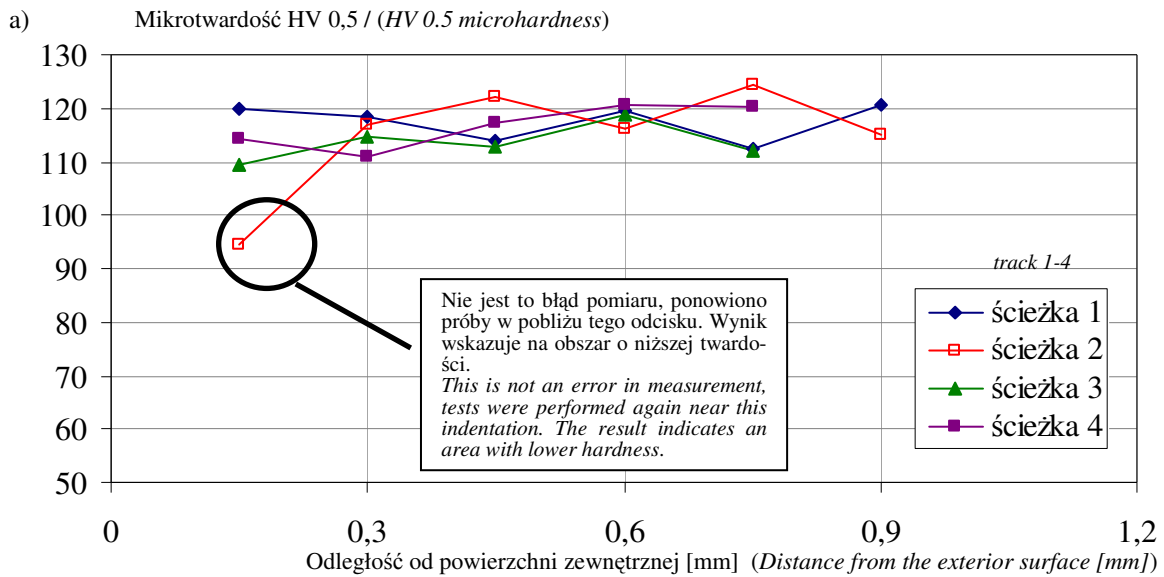
Rys. 13. Rozkład mikrotwardości HV 0,5 na grubości próbki 1 (a) oraz ścieżka mikrotwardości nr 3 (b);  
wyniki zbliżone do wyników twardości wzdłuż próbki z rys. 11

Fig. 13. Distribution of HV 0.5 microhardness on the thickness of sample 1 (a) and microhardness track No. 3 (b);  
results similar to the hardness results along the sample in fig.



Rys. 14. Widok próbki 2 wraz z zaznaczonymi miejscami wykonania pomiarów mikrotwardości (a), rozkład mikrotwardości HV 0,5 na grubości wytłoczki – próbka 2 (b), ścieżka mikrotwardości nr 1 (c)  
 Fig. 14. View of sample 2 with marked locations of microhardness measurements (a), distribution of HV 0.5 microhardness on the thickness of the drawpiece – sample 2 (b), microhardness track No. 1 (c)



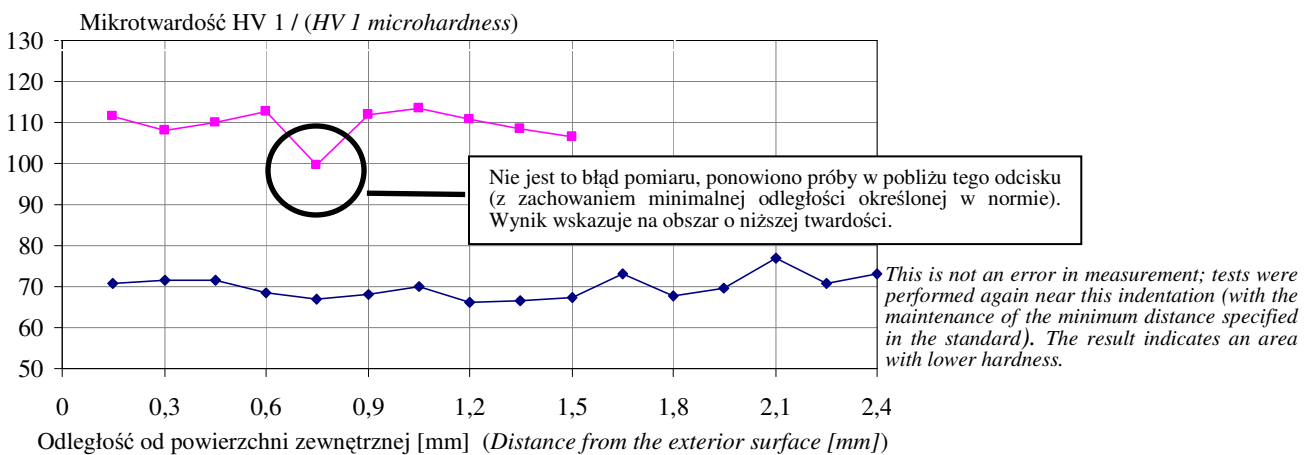


Rys. 15. Rozkład mikrotwardości HV 0,5 na grubości próbki 3

Fig. 15. Distribution of HV 0.5 microhardness on the thickness of sample 3

Widać na rys. 15, że wyniki mikrotwardości na grubości próbki są zbliżone do wyników twardości wzdłuż próbki (z rys. 11).

It is visible in fig. 15 that microhardness results on the thickness of the sample are similar to hardness results along the sample (from fig. 11).



Rys. 16. Rozkład mikrotwardości HV 1 na grubości przykładowych próbek (górny wykres - próbka 1, dolny - próbka 0)

Fig. 16. Distribution of HV 1 microhardness on the thicknesses of exemplary samples (top chart - sample 1, bottom chart - sample 0)

Tabela 6. Zestawienie mikrotwardości HV 0,5 i HV 1 próbek (wzdłuż i w poprzek próbek)  
 Table 6. List of HV 0.5 and HV 1 microhardnesses of samples (along and across samples)

Próbka Sample	Mikrotwardość HV 0,5 (średnia) HV 0.5 microhardness (average)	Mikrotwardość HV 0,5 na grubości (średnia) HV 0.5 microhardness on thickness (average)	Mikrotwardość HV 1 (średnia) HV 1 microhardness (average)
0 blacha wyjściowa 0 initial sheet	75,0	74,8	69,9
1 – po pierwszej operacji zgniatania obrotowego 1 - after the first flow forming operation	115,0	112,8	109,0
2 strefa 3 wg rys. 9 2 area 3 according to fig. 9	107,0	103,0	-
2 strefa 2 wg rys. 9 2 area 2 according to fig. 9	110,0	112,0	-
2 strefa 1 wg rys. 9 2 area 1 according to fig. 9	110,0	110,0	-
3 – po drugiej operacji zgniatania obrotowego 3 - after the second flow forming operation	112,0	115,8	-

Wyniki pomiarów mikrotwardości HV 0,5 oraz HV 1 są bardzo zbliżone. Można zatem stwierdzić, że pomiary są wiarygodne. Mimo różnego udziału granic i wnętrza ziarna przy pomiarze HV 1 i HV 0,5 wyniki są podobne.

Nie zauważa się istotnej różnicy w wynikach mikrotwardości wzdłuż i w poprzek próbek (tabela 6). Nie można przypisać większej twardości do którejś z powierzchni próbek (zewewnętrznej lub wewnętrznej).

Jako uzasadnienie stabilizacji twardości, mimo rosnącego odkształcenia, wskazać należy heterogenizację odkształcenia i lokalizację deformacji w pasmach ścinania (związaną ze zmianą drogi odkształcenia w procesie kształtowania) w technologii zgniatania obrotowego. Udowodnieniu tego twierdzenia poświęcone są dalsze badania zawarte w pracy [1].

#### 4. WNIOSKI

1) Nie zauważa się znaczącej różnicy twardości między strefami próbek – tłoczona a zgniatanymi obrotowo. Różnica mikrotwardości między próbką z blachy wyjściowej, a odkształcanymi zawiera się w zakresie ok. 35 HV 0,5. Kolejne operacje zgniatania nie powodują istotnego wzrostu mikrotwardości ścianki poboczniczy.

*The results of HV 0.5 and HV 1 microhardness measurements are very similar. It can therefore be stated that measurements are credible. Despite the different share of grain boundaries and interiors in HV 1 and HV 0.5 measurements, results are similar.*

*No significant difference is observed between microhardnesses measured along and across samples (table 8). A greater hardness cannot be assigned to one of the sample surfaces (interior or exterior).*

*To justify hardness stabilization despite increasing strain, the heterogenization of strain and its localization in shear bands should be indicated (related to a change in the strain path during the forming process) in flow forming technology. Further studies contained in paper [1] are dedicated to proving this statement.*

#### 4. CONCLUSIONS

1) *No significant difference in hardness is observed between sample areas – press drawn and flow formed. The difference in microhardness between the sample made from initial sheet and the formed samples is within the range of approx. 35 HV 0.5. Successive flow forming operations do not cause a significant increase in the microhardness of the side wall.*

- 2) Wyniki pomiarów mikrotwardości HV 0,5 i HV 1 są zbliżone. Nie widać również istotnej różnicy w wynikach mikrotwardości wzdłuż i w poprzek badanych próbek. Nie sposób zatem jednoznacznie przypisać większej twardości do którejś z powierzchni próbek (zewnętrznej lub wewnętrznej). Badania nad wskazaniem przyczyny stabilizacji twardości, mimo rosnącego stopnia odkształcenia, były przedmiotem pracy doktorskiej [1].
- 3) Zarówno średnica zewnętrzna, jak i wewnętrzna zgniatanej wytłoczki rośnie od dna do krawędzi pobocznic (jest to związane ze zjawiskiem sprężynowania powrotnego materiału – tzw. puchnięcie wytłoczki). Jak wynika z badań, grubość ścianki pobocznic wytłoczki zgniecionej obrotowo również nie jest stała na całej swojej długości. Zadanie jednej szczeliny technologicznej daje w rezultacie różne wyniki grubości ścianki poszczególnych wytłoczek. Wynika to zarówno z rozrzutu grubości ścianki po tłoczeniu, jak również z drgań w procesie zgniatania (zazwyczaj zgniatarka nie jest na tyle sztywna, by zagwarantować pełną stałość wymiaru szczeliny technologicznej) oraz różnicy wymiarów między wytłoczką (średnica wewnętrzna), a wzornikiem (średnica zewnętrzna).
- 2) *The results of HV 0.5 and HV 1 microhardness measurements are similar. No significant difference is also observed between microhardnesses measured along and across samples. Therefore, a greater hardness cannot be unequivocally assigned to one of the sample surfaces (interior or exterior). Research on determining the cause of hardness stabilization despite an increasing degree of deformation was the subject of doctor's thesis [1].*
- 3) *The exterior as well as the interior diameter of the formed drawpiece increases from the bottom to the edge of the side wall (this is related to the material spring-back phenomenon - so-called swelling of the drawpiece). As results from studies, the thickness of the side wall of a roll formed drawpiece is also not constant over its entire length. The setting of a single technological gap gives different results of wall thicknesses of individual drawpieces. This results both from the dispersion of wall thickness after drawing and from vibrations during the flow forming process (usually, the roll former is not rigid enough to guarantee full constancy of the technological gap), as well as from the difference in dimensions between the drawpiece (interior diameter) and the template (exterior diameter).*

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Pawlicki M., *Plastyczne kształtowanie metali w technologii zgniatania obrotowego*. Poznań – Kraków, 2013. Praca doktorska dostępna w Bibliotece Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu i Bibliotece Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
- [2] Drenger T., Wiśniewski J., Pawlicki M., Ulatowski Z., Gądek T., Nowacki Ł., Frąckowiak S., *Badania procesów tłoczenia i zgniatania obrotowego wytłoczek z materiału trudno odkształcalnego Alloy 825*. *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XXII (2011) 3.
- [3] Drenger T., Nowacki Ł., Gądek T., Frąckowiak S., Pawlicki M., *Kształtowanie obrotowe wyrobów z materiałów trudno odkształcalnych*. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*, t. 10 (2011) 49.
- [4] Drenger T., Wiśniewski J., Lisowski J., Gądek T., *Badania procesu zgniatania obrotowego przyrostowego, wytłoczek z super stopu niklu Inconel 625 i stali nierdzewnej 0H18N9*. *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XXI (2010) 2.
- [5] Gądek T., Sosnowski S., Drenger T., Wiśniewski J., Nowacki Ł., Ulatowski Z., *Badanie procesu zgniatania obrotowego na zimno wyrobów z trudno odkształcalnych stopów aluminiowych objętych normą PN-EN 573-3/AK*. *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XVIII (2007) 2.
- [6] Drenger T., Wiśniewski J., Sosnowski S., Nowacki Ł., Gądek T., Ulatowski Z., *Rozpoznawcze badania możliwości kształtowania metodami obróbki plastycznej elementów ze stopu niklu Inconel 625*. *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XVIII (2007) 2.
- [7] Gądek T., *Badanie możliwości kształtowania stopu Hastelloy C-276 metodą tłoczenia oraz zgniatania obrotowego*. *Obróbka Plastyczna Metali*, t. XXII (2011) 1.

- [8] Hadasik E. (red.), Przetwórstwo metali. Plastyczność a struktura. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [9] Bochniak W., Teoretyczne i praktyczne aspekty plastycznego kształtowania metali. Metoda KoBo. Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2009.
- [10] Gronostajski Z., Badania stosowane w zaawansowanych procesach kształtowania plastycznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [11] Dzikowski W., Dembny J., Olej emulgujący do obróbki plastycznej, patent nr 154824, 1987.
- [12] PN-EN ISO 6507-1:2007 – Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań.
- [13] Instrukcja badawcza Z-IB/3-05 – Obserwacje struktury metali i stopów, Instytut Obróbki Plastycznej. Wydanie V (8 marca 2010).