

Mgr inż. Tomasz GADEK
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
e-mail: gadek@inop.eu

Badanie możliwości kształtowania stopu Hastelloy C-276 metodą tłoczenia oraz zgniatania obrotowego

Investigation of the possibility of forming Hastelloy C-276 alloy by the method of deep drawing and flow forming

Streszczenie

W artykule zamieszczono informacje na temat kształtowania materiału Hastelloy C-276 metodą obróbki plastycznej. Krążki o średnicy $\varnothing 200$ mm z materiału Hastelloy C-276 tłoczono na prasie hydraulicznej, celem przygotowania wstępniaków. Następnie wstępniaki kształtowano metodą zgniatania obrotowego wydłużającego z zastosowaniem międzyoperacyjnej obróbki cieplnej. Podczas zgniatania obrotowego dla poszczególnych operacji zastosowano 20% i 30% odkształcenie. W artykule zamieszczono wyniki badań z tłoczenia oraz zgniatania obrotowego, wraz z pomiarem rozkładu grubości ścianki na całej długości poboczniczy.

Abstract

The paper contains information on forming Hastelloy C-276 material by the method of metal forming. Hastelloy C-276 disks have been stamped on a hydraulic press in order to make blanks. Then the blanks were formed by the method of elongating flow forming with the application of interoperation heat treatment. During flow forming, deformation of 20% and 30% has been applied. The paper presents investigation results of deep drawing and flow forming including the measurement of wall thickness distribution on the whole side wall length.

Słowa kluczowe: Hastelloy C-276, zgniatanie obrotowe, tłoczenie

Key words: Hastelloy C-276, flow forming, deep drawing

1. WSTĘP

Stop Hastelloy C-276 jest nadstopem niklu, chromu i molibdenu, o średniej zawartości niklu ok. 57%. Hastelloy C-276 wykazuje znaczną odporność korozyjną w różnych środowiskach chemicznych, także w środowisku silnych utleniaczy: chlorków miedzi i żelaza, kwasu mrówkowego, wody morskiej.

Stop ten charakteryzuje się także dużą odpornością na wżery i korozję naprężeniową.

Niska zawartość węgla zmniejsza wytrącanie węglika, dzięki czemu stop Hastelloy C-276 nadaje się również na konstrukcje spawane w przemyśle chemicznym.

1. INTRODUCTION

Hastelloy C-276 is a superalloy of nickel, chromium and molybdenum with an average nickel content of 57%. Hastelloy C-276 reveals good corrosion resistance in various chemical environments, also in strong oxidants: copper chlorides and iron chlorides, formic acid, sea water

The alloy is also highly resistant to pits and stress corrosion.

Low carbon content reduces carbide precipitation, due to which Hastelloy C-276 is also suitable for welded structures in the chemical industry.

Stopy na osnowie niklu są często stosowane, m.in. w przemyśle wydobywczym ropy naftowej i gazu ziemnego, na narażone na korozję części urządzeń do głębokich odwiertów źródeł tych surowców.

Ze stopów niklu wykonuje się głównie wyroby rurowe stosowane przy eksploatacji tzw. źródeł zakwaszonych,. Są to źródła ropy i gazu zawierające dużo siarkowodoru, chlorków i dwutlenku węgla [1].

Stop Hastelloy C-276 jest ponadto powszechnie stosowany w przemyśle celulozowo-papierniczym, na części wentylatorów używanych podczas spalania i odsiarczania gazów oraz na elementy chłodnic.

Wyroby ze stopu Hastelloy C-276 stosowane są również w przemyśle produkcji i przetwarzania kwasu fosforowego, a także w przemyśle przetwarzania odpadów komunalnych, w farmaceutyce i w urządzeniach przemysłu spożywczego.

W literaturze technicznej krajowej i zagranicznej jest bardzo mało publikacji dotyczących obróbki plastycznej materiału Hastelloy C-276. Większość publikacji dotyczy elektrochemicznej obróbki stopu Hastelloy oraz badań powłok galwanicznych. W artykule [2] autorzy zamieścili informację na temat wpływu starzenia się materiału na jego twardość. Przed badaniem próbki wygrzewano w piecu przez 1 godzinę w temperaturze 1200 °C, a następnie studzono w wodzie. Stwierdzono, że starzenie się materiału przez 240 godzin w temperaturze 650 °C, nie wpływa na zmianę twardości materiału. Jednak podczas badania materiału w temperaturze 850 °C, zaobserwowano wzrost twardości materiału po 96 godzinach wygrzewania. Po tym czasie twardość materiału utrzymywała się na stałym poziomie. Tak więc, starzenie się materiału w temperaturze 850 °C zwiększa twardość, a tym samym zmniejsza jego plastyczność i możliwości zastosowania obróbki plastycznej.

Natomiast podczas badania zmian mikrostruktury nadstopów niklu spowodowanych obróbką plastyczną, zaobserwowano, że po procesie walcowania i wyżarzeniu w temperaturze 1300 °C stopy Hastelloy B oraz stop MoNiCr, (którego zawartość molibdenu jest najbardziej zbliżona do stopu Hastelloy C-276)

Nickel matrix alloys are often applied, among others, in oil and gas mining industry for the parts of deep drilling devices.

Nickel alloys are mainly used for tubular products applied in the exploitation of so called acidified sources. Those are sources of oil and gas containing much hydrogen sulfide, chlorides and carbon dioxide [1].

The Hastelloy C-276 alloy is also commonly used in the paper industry, for parts of ventilators used in burning and desulfurization of gases, as well as for cooler elements.

Products made of Hastelloy C-276 are also used in the phosphoric acid production and processing industry and in municipal waste disposal, in pharmaceuticals and food production devices.

In the Polish and foreign technical literature, there are very few publications dealing with plastic forming of the Hastelloy C-276 material. Most publications deal with electrochemical treatment of the Hastelloy C-276 alloy and investigation of electroplated coatings. In article [2], the authors have placed information on the influence of the material ageing on its hardness. Prior to the examination, samples were soaked in a furnace at 1200 degrees for 1 hour and then cooled in water. It has been found that material ageing for 240 at 650 degrees does not influence the change of its hardness. However, when the material was examined at the temperature of 850 degrees, an increase of its hardness has been observed after 96 hours of soaking. After that time the material hardness kept at a constant level. Therefore, ageing of the material at 850 degrees increases its hardness and, consequently, reduces its plasticity and the possibility of metal forming application.

On the other hand, in the examination of nickel superalloy microstructure changes due to plastic forming, it has been found that, after the process of rolling and annealing at 1300 degrees, alloys Hastelloy B and MoNiCr (whose molybdenum content is closest to that of Hastelloy C-276) revealed good plasticity

wykazały dobrą plastyczność i możliwość osiągnięcia jednolitej gruboziarnistej mikrostruktury. Szczególnie w przypadku stopu MoNiCr, jakość powierzchni po procesie walcowania na gorąco była bardzo dobra [3]. Informacje na temat odkształcenia materiału podczas pełzania są umieszczone w publikacji [4]. Próbki były wyżarzane w temperaturze 1163 °C i chłodzone w wodzie. Następnie w temperaturze 750 °C, 850 °C i 950 °C w warunkach długotrwałego obciążenia poddano je obciążeniu odpowiadającemu 25% granicy plastyczności.

Mimo, że po 1000 godzinach materiały konstrukcyjne nie powinny wykazywać deformacji powyżej 1% odkształcenia, stwierdzono, że to kryterium było spełnione tylko dla stopu C-276 w temperaturze 750 °C. W temperaturze 850 °C odkształcenie wynosiło ok. 4%, zaś po 400 godzinach w temperaturze 950 °C odkształcenie wzrosło do ponad 30% [4].

Celem zwiększenia wytrzymałości stopy niklu są zwykle utwardzane przez odkształcanie plastyczne na zimno w temperaturze niższej od temperatury rekrytalizacji. W odkształconym plastycznie na zimno metalu ziarna są zdeformowane, a gęstość dyslokacji jest wyższa, niż w materiale wyżarzonym. Ze wzrostem odkształcenia plastycznego na zimno wzrasta twardość i wytrzymałość stopu, natomiast wydłużenie ulega obniżeniu.

W wyniku zastosowania 50% stopnia odkształcenia plastycznego na zimno, twardość stopu C-276 może zostać zwiększona dwukrotnie od 190 HB (w stanie wyżarzonym), do 380 HB [5].

Porównawcze badania współczynnika dyfuzji wodoru w odkształconym plastycznie oraz w wyżarzonym stopie niklu C-276 wykazały, że odkształcenie plastyczne zwiększa szybkość dyfuzji w tym stopie. W przypadku, gdy stopień odkształcenia plastycznego wynosi 50%, współczynnik dyfuzji wodoru jest 2,7 razy większy niż w materiale wyżarzonym [1].

W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu podjęto badania kształtowania materiału Hastelloy C-276 metodami tłoczenia oraz zgniatania obrotowego. Badania miały na celu określenie możliwości i warunków kształtowania materiału Hastelloy C-276 metodami obróbki plastycznej.

and possibility of obtaining even coarse-grained microstructure. Particularly, in the case of the MoNiCr alloy, the surface quality after the process of hot rolling was very good [3]. Information on material deformation during creeping can be found in publication [4]. The samples were annealed at 1163 degrees and cooled in water. Then, at 750, 850 and 950 degrees under long lasting load, they were subjected to a load corresponding to 25% of the yield point.

Although constructional materials should not reveal deformation above 1% of strain, this criterion has been found fulfilled only for the C-276 alloy at the temperature of 750 degrees. At 850 degrees, the deformation was about 4% and, after 400 hours at 950 degrees it has grown up to over 30% [4].

In order to increase their strength, nickel alloys are usually hardened by cold plastic deformation at a temperature lower than that of recrystallization. In cold plastically deformed metal, the grains are deformed and the density of dislocation is higher than in the annealed material. As the cold plastic deformation increases, the hardness and strength of the alloy grow, but its elongation decreases.

As a result of 50% cold plastic deformation the hardness of the C-276 alloy can be increased twice, from 190 HB (in the annealed state) up to 380 HB [5].

Comparative investigation of the hydrogen diffusion coefficient in plastically deformed and in annealed C-276 nickel alloy has shown that plastic deformation increases the rate of diffusion in the alloy. When the plastic deformation is 50%, the hydrogen diffusion coefficient is 2.7 times larger than in the annealed material [1].

The Metal Forming Institute in Poznań has undertaken investigation of forming the Hastelloy C-276 by the methods of deep drawing and flow forming. The purpose of the investigation was to determine the possibility and conditions of forming the Hastelloy C-276 material by the methods of metal forming.

1. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiałem wyjściowym do badań były krążki z blachy cięte strumieniem wody o wymiarach: $\varnothing 200 \times 2$ i $\varnothing 200 \times 3$ ze stopu C-276 (rys. 1). Twardość krążków w stanie wyjściowym wynosiła średnio 53 HRA. Skład chemiczny stopu Hastelloy C-276 przedstawiono w tablicy 1.

Stop ten charakteryzuje się dużą podatnością do umocnienia podczas kształtowania metodami obróbki plastycznej. Stop Hastelloy C-276 charakteryzuje się granicą plastyczności $R_{0,2} = 405$ MPa i wytrzymałością na rozciąganie $R_m = 765$ MPa oraz wydłużeniem A_5 do zerwania min. 62% [6].

Z krążków wytłoczono miseczki. Tłoczenie miseczek ze stopu Hastelloy C-276 stanowiło pierwszy etap badań, których celem było określenie możliwości kształtowania stopu metodami obróbki plastycznej, jak również przygotowanie wstępniaków do dalszych badań procesu zgniatania obrotowego wydłużającego.

1. TEST MATERIAL

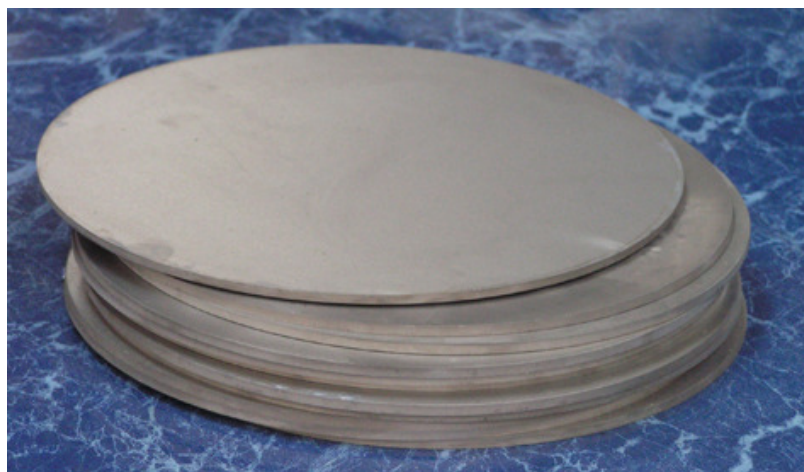
The initial material for the investigation was sheet metal disks cut with a water beam with the dimensions of: $\varnothing 200 \times 2$ and $\varnothing 200 \times 3$ made of the C-276 alloy (fig. 1). The hardness of the disks in the initial state was, average 53 HRA. The chemical composition of the C-276 alloy can be seen in Table 1.

The alloy under discussion is characterized by high susceptibility to strain hardening during shaping by the methods of metal forming. The Hastelloy C-276 alloy has the yield point of $R_{0,2} = 405$ MPa and tensile strength of $R_m = 765$ MPa and elongation of $A_5 = \text{min. } 62\%$ [6].

Cups have been stamped out of the disks. Deep drawing cups of the Hastelloy C-276 alloy was the first stage of investigation, the purpose of which was to determine the possibility of shaping the alloy by the methods of metal forming, as well as to prepare blanks for further investigation of elongating flow forming processes.

Tablica 1. Skład chemiczny stopu Hastelloy C-276
Table 1. Chemical composition of Hastelloy C-276 alloy

Ni	Mo	Cr	Fe	W	Mn	Co	C	S
56,8-57,4	16,1-16,3	16 - 16,2	5,95-6,14	3,35-3,45	0,44-0,5	0,16-0,5	0,003	0,002



Rys. 1. Krążki do badań procesu tłoczenia z wyrobów ze stopu Hastelloy C-276
Fig. 1. Disks for testing the process of deep drawing Hastelloy C-276 alloy products

2. STANOWISKA DO BADAŃ TECHNOLOGICZNYCH W INSTYTUCIE OBROBKI PLASTYCZNEJ W POZNANIU

Badania przeprowadzono na stanowiskach badawczych Instytutu, w których znajdowały się: prasa hydrauliczna PYE-250 o nacisku 2500 kN (rys. 2) oraz zgniatarka obrotowa MZH-400 (rys. 3).

Do prób na prasie PYE-250 zastosowano tłocznik do tłoczenia wytłoczek cylindrycznych z krążka (rys. 4). Natomiast do prób zgniatania wydłużającego zastosowano wzornik cylindryczny oraz komplet rolek zgniatających o kącie natarcia 30° (rys. 5).

2. TECHNOLOGICAL INVESTIGATION STANDS IN THE METAL FORMING INSTITUTE IN POZNAŃ

The investigation has been performed on the Institute's test stands provided with: a PYE-250 hydraulic press with the capacity of 2500 kN (fig. 2) and an MZH-400 flow forming machine (fig. 3).

In the tests on the PYE-250 press, a die for stamping cylindrical drawpieces out of a disk has been used (fig. 4). Elongating flow forming tests have been performed with the use of a cylindrical templet and a set of rolls with the rake angle of 30 degrees (fig. 5).



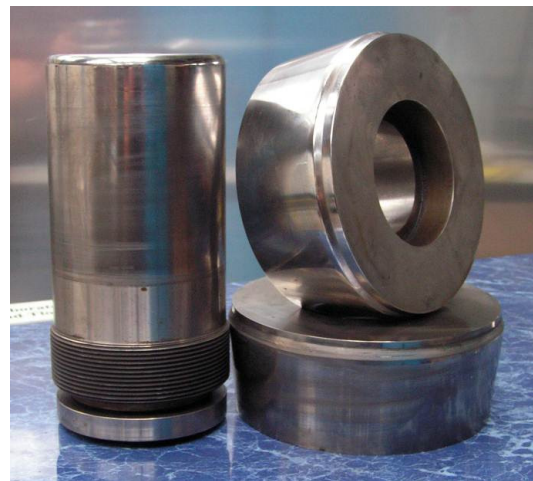
Rys. 2. Prasa hydrauliczna PYE-250
Fig. 2. PYE-250 hydraulic press



Rys. 3. Zgniatarka obrotowa MZH-400
Fig. 3. MZH-400 flow forming machine



Rys. 4. Tłocznik do tłoczenia wytłoczek ze stopu Hastelloy C-276
Fig. 4. Stamping die for stamping drawpieces of the Hastelloy C-276 alloy



Rys. 5. Narzędzia do zgniatania obrotowego wydłużającego na zgniatarce obrotowej MZH-400
Fig. 5. Tools for elongating flow forming on the MZH-400 flow forming machine

3. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono celem sprawdzenia możliwości odkształcania plastycznego stopu Hastelloy C-276 w procesie tłoczenia oraz zgniatania obrotowego wydłużającego. Badania przeprowadzono w gnieździe badawczym Instytutu Obróbki Plastycznej w Poznaniu na prasie hydraulicznej PYE-250 oraz sterowanej numerycznie zgniatarce obrotowej MZH-400. Zgniatarka została wyposażona w dwie rolki umieszczone naprzeciw siebie oraz wzornik cylindryczny.

Dobór geometrii oraz wymiarów roboczej części matrycy i stempla do tłoczenia przyjęto na podstawie danych z literatury [7-8], uwzględniając różne grubości krążków. Przy wytłaczaniu krążków o średnicy $\phi 200$ mm stosowano dociskacz. W procesie tłoczenia uzyskano wytłoczki o zakładanym i poprawnym kształcie, które przeznaczono do badań procesu zgniatania obrotowego wydłużającego.

Pozytywne wyniki uzyskano w procesie wytłaczania miseczek z krążków o grubości 2 i 3 mm badanego materiału. Maksymalna siła P potrzebna do wytłaczania wytłoczek z krążków o grubości 2 mm wynosiła $P = 598,21$ kN przy maksymalnej sile dociskacza $q = 119,3$ kN. Badania procesu wytłaczania wytłoczek z krążków o grubości 3 mm przy współczynniku ciągnięcia $m \cong 0,63$ dały wynik pozytywny przy maksymalnej sile nacisku prasy $P = 617,82$ kN i maksymalnej sile dociskacza $q = 107,1$ kN.

Badania procesu zgniatania obrotowego wydłużającego przeprowadzono na wytłoczkach o grubości 2 i 3 mm bez stosowania wstępnej obróbki cieplnej.

Proces zgniatania obrotowego przeprowadzono przy posuwie na obrót równym 0,6 [mm/obr.] i 0,7 [mm/obr.]. Założono, że próbki zostaną przebadane przy odkształceniu w poszczególnych operacjach równych 20% oraz 30%.

Odkształcenie względne określono wg wzoru (1):

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

3. INVESTIGATION METHODOLOGY

The investigation has been performed in order to check the possibility of plastic deformation of the Hastelloy C-276 alloy in the process of deep drawing and elongating flow forming. Tests have been carried out in the test stand of the Metal Forming Institute on the PYE-250 hydraulic press and numerically controlled rotary extrusion machine, MZH-40. The flow forming machine has been equipped with two rolls located opposite each other and a cylindrical templet.

The selection of the stamping die geometry and dimensions has been based on data from literature [7-8] considering various disk thicknesses. When drawing disks of $\phi 200$ mm, a blankholder has been used. In the process of deep drawing, drawpieces of the assumed and correct shape have been obtained; they have been used for the investigation of the elongating flow forming process.

Positive results have been obtained in the process of drawing cups out of 2 mm and 3 mm thick disks of the material under investigation. The maximum force necessary to make drawpieces of the 2 mm thick disks was $P = 598.21$ kN with the maximum blankholder force of $q = 119.3$ kN. Investigation of the process of drawing drawpieces out of 3 mm thick disks with the coefficient of drawing, $m \sim 0.63$ has rendered positive result with the maximum press force of 617.82 kN and maximum blankholder force, $q = 107.1$ kN.

The investigation of elongating flow forming has been performed on 2 and 3 mm thick drawpieces without the application of initial heat treatment.

The flow forming process has been effected with the travel rate of 0.6 [mm/rev.] and 0.7 [mm/rev.]. It has been assumed that the samples will be examined with the deformation of 20% and 30% in the individual operations.

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

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

t_0 – grubość ścianki poboczniczy przed zgniataniem obrotowym [mm],

t_1 – grubość ścianki poboczniczy po zgniataniu obrotowym [mm].

Podczas procesu zgniatania obrotowego stosowano międzyoperacyjną obróbkę cieplną po każdej operacji zgniatania. Próbki były wygrzewane przez godzinę w piecu w atmosferze ochronnej w temperaturze $T = 1120$ °C i chłodzone w oleju.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Badania procesu tłoczenia na prasie hydraulicznej PYE-250

W tablicy 2 przedstawiono wyniki badań procesu tłoczenia wytłoczek z materiału Hastelloy C-276 o grubości 2 i 3 mm oraz wymiary wytłoczek.

Podczas prób tłoczenia materiału o grubości 2 mm zastosowano środek smarny Quaker N 6130. Chropowatość pierwszej wytłoczki (rys. 6a) mierzona wzdłuż tworzącej na odcinku pomiarowym 15 mm, wynosiła $R_a = 2,95$ μm , natomiast w przypadku ostatniej wytłoczki zauważyć można zarysowania na poboczniczy wzdłuż kierunku tłoczenia (rys. 6b). Urządzenie pomiarowe nie pozwalało na zmierzenie chropowatości wyrobu po obwodzie. Ponieważ środek smarny Quaker N 6130 powodował oklejanie matrycy, a tym samym pogorszenie jakości powierzchni wyrobu, w dalszych badaniach zastąpiono go Parafinolem. Zmiana środka smarnego pozwoliła na uzyskanie niezmiennej chropowatości podczas tłoczenia krążków o grubości 3 mm. Chropowatość pierwszej (rys. 7a), jak i ostatniej wytłoczki (rys. 7b) mieściła się w zakresie od $R_a = 5,55$ do $R_a = 5,75$ μm .

Po próbie tłoczenia wykonano pomiary twardości wytłoczek. Pomiary wykonano wzdłuż tworzącej, zaczynając od dna wytłoczki. Wraz ze wzrostem odległości od dna twardość materiału dla wytłoczki o grubości 3 mm wzrastała od wartości 53,3 HRA do 66,5 HRA. Natomiast dla wytłoczki o grubości 2 mm twardość materiału wynosiła od 55,8 HRA do 69,9 HRA.

where:

t_0 - side wall thickness prior to flow forming,

t_1 - side wall thickness after flow forming.

During the flow forming process, inter-operation heat treatment has been applied after each forming operation. The samples were soaked in a furnace in a protective atmosphere at $T = 1120$ degrees and cooled in oil.

4. INVESTIGATION RESULTS

4.1. Investigation of the deep drawing process on the PYE-250 hydraulic press

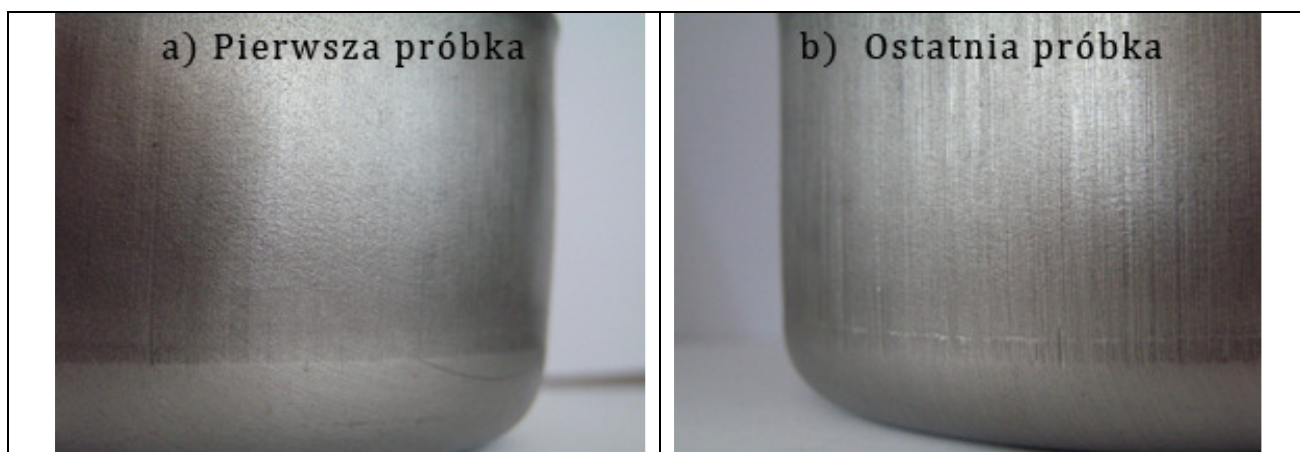
Table 2 presents the results of stamping drawpieces of 2 and 3 mm thick Hastelloy C-276, as well as the dimensions of the drawpieces.

During the tests of deep drawing 2 mm thick material, Quaker N 6130 lubricant has been applied. The roughness of the first drawpiece (fig. 6a), measured along the generatrix on a measurement length of 15 mm, was $R_a = 2.95$ μm ; in the case of the last drawpiece, on the other hand, scratches can be observed on the side wall along the direction of stamping (fig. 6b). The measuring device did not allow for measuring the product roughness along its circumference. Since the Quaker N 6130 lubricant stuck on the die and, consequently, caused deterioration of the product surface quality, it has been replaced with Parafinol in the further investigation. The change of the lubricant has allowed us to obtain constant roughness when stamping 3 mm thick disks. The roughness of the first drawpiece (fig. 7a) as well as that of the last one (fig. 7b) was within the range of $R_a = 5.55$ to $R_a = 5.75$ μm .

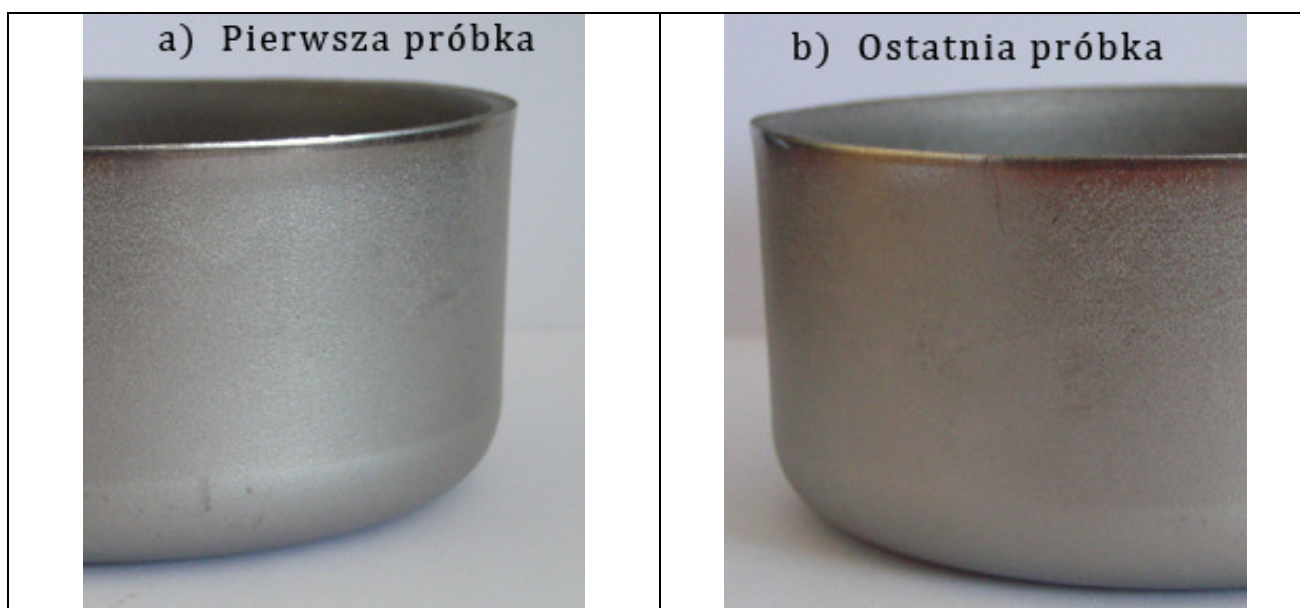
After the deep drawing test, the hardness of the drawpieces has been measured. The measurements have been performed along the generatrix starting from the drawpiece bottom. The hardness of a 3 mm thick drawpiece grew with the increase of the distance from the bottom from 53.3 HRA to 66.5 HRA. In the case of the 2 mm thick drawpiece, on the other hand, the material hardness was from 55.8 HRA to 69.9 HRA.

Tablica 2. Wymiary wytłoczek po procesie kształtowania na prasie PYE-250
 Table 2. Dimensions of drawpieces after the process of forming on the PYE-250 press

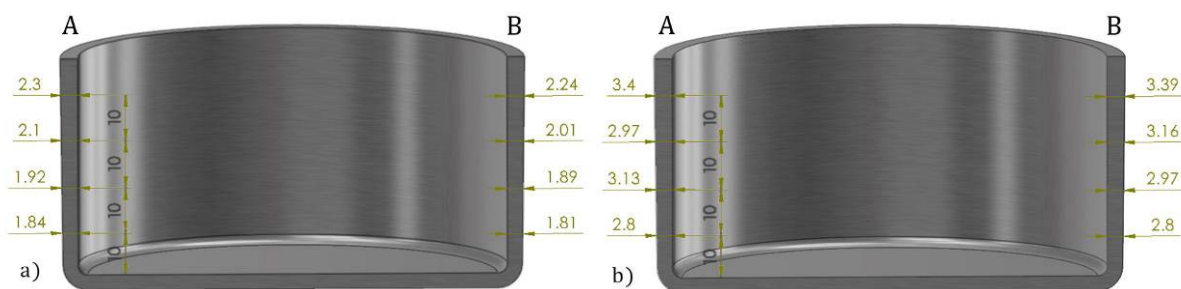
Nr próbki Sample no.	Parametry wytłoczki/Drawpiece parameters				Wymiary wytłoczki/Drawpiece dimensions			
	Grubość materiału wytłoczki Drawpiece material thickness t_0 [mm]	Siła tłoczenia na prasie Press stamping force P [kN]	Siła dociskania Blankholder force q [kN]	Współczynnik ciągnięcia Drawing coefficient m	Średnica zew. wytłoczki Drawpiece outer dia. \varnothing_z [mm]	Średnica wew. wytłoczki Drawpiece inner dia. \varnothing_w [mm]	Śr. gr. ścianki wytłoczki Average drawpiece wall thickness t [mm]	Wysokość wytłoczki Drawpiece height h [mm]
1-18	2	588,4-598,2	108,2-119,3	0,62	124,6-125,1	120,06-120,3	1,97-2,02	57,2-59,2
1-18	3	598,2-617,2	92,2 – 107,1	0,63	126,1-126,3	119,-120,08	3,05-3,1	57-57,6



Rys. 6. Wytłoczka ze stopu Hastelloy C-276 tłoczona z zastosowaniem środka smarnego Quaker N 6130
 Fig. 6. A Hastelloy C-276 drawpiece made with the application of the Quaker N 6130 lubricant



Rys. 7. Wytłoczka ze stopu Hastelloy C-276 tłoczona z zastosowaniem środka smarnego Parafinol
 Fig. 7. A Hastelloy C-276 drawpiece made with the application of the Parafinol lubricant



Rys. 8. Grubość ścianki wytłoczki ze stopu Hastelloy C-276 po tłoczeniu wyrobu z blachy:
a) 2 mm, b) 3 mm; A, B – przeciwległe strony wyrobu

Fig. 8. Hastelloy C-276 drawpiece wall thickness after the product deep drawing of sheet with the thickness of:
a) 2 mm, b) 3 mm; A, B - opposite sides of the product

Zmiany twardości spowodowane były wzrastaniem przeformowania materiału podczas procesu tłoczenia w górnej części wytłoczki, gdzie występował wzrost grubości ścianki dla wyrobu z blachy o grubości z materiału wyjściowego 2 mm (rys. 8a) oraz o grubości z materiału wyjściowego 3 mm (rys. 8b).

4.2. Badania procesu zgniatania obrotowego na zgniatarce MZH-400

Po próbie tłoczenia wytłoczki były kształtowane metodą zgniatania obrotowego wydłużającego. Pomędzy poszczególnymi operacjami zgniatania obrotowego stosowano obróbkę cieplną, celem wyeliminowania naprężeń powstałych podczas obróbki plastycznej.

W tabelicy 3 zestawiono wyniki pomiarów wyrobów z materiału Hastelloy C-276 o grubości 2 mm po operacji zgniatania obrotowego wydłużającego. Dla materiału o grubości 3 mm wyniki przedstawiono w tabelicy 4.

Zarówno przy planowanych odkształceniach 20%, jak i 30% uzyskano końcową grubość ścianki około 0,7 mm. Minimalna grubość ścianki wynosi 0,68 mm. Poniżej tej wartości następowało zerwanie materiału (rys. 9).

Twardość materiału po każdej operacji zgniatania obrotowego wahała się w przedziale od 70,3 HRA do 71,8 HRA.

Dla odkształcenia 30% w poszczególnych operacjach uzyskano grubość ścianki około 0,7 mm. Oznacza to, że istnieje możliwość plastycznego kształtowania materiału C-276 o grubości 2 i 3 mm.

The hardness changes were due to the increase of deformation of the material during the process of deep drawing the upper part of the drawpiece, where wall thickness increase took place in the product of initial material thickness of 2 mm (fig. 8a) and 3 mm (fig. 8b).

4.2. Investigation of the flow forming process on the MZH-400 machine

After the deep drawing test, the drawpieces were shaped by the method of elongating flow forming. Between the individual operations of flow forming, heat treatment has been applied in order to eliminate the stresses arisen in plastic forming.

In table 3, one can find the measurement results of 2 mm thick Hastelloy C-276 products after the operation of elongating flow forming. The results for 3 mm thick material have been assembled in table 4.

Both in planned deformations of 20% and 30%, the final wall thickness obtained was about 0.7 mm. The minimum wall thickness is 0.68 mm. Below that value the material broke (fig. 9).

The material hardness after each flow forming operation varied within the range of 70.3 HRA to 71.8 HRA.

For deformation of 30% in the individual operations, wall thickness of about 0.7 mm has been obtained. This means that there is a possibility of plastic forming of 2 and 3 mm thick C-276 material.

Tablica 3. Wyniki pomiarów wyrobów ze stopu Hastelloy C-276 o grubości 2 mm po operacji zginięcia obrotowego wydłużającego

Table 3. Measurement results of 2 mm thick Hastelloy C-276 alloy after the operation of elongating flow forming

Nr próbki Sample no.	Posuw [mm/obr] Travel [mm/rev]	Ilość operacji Number of operations	Min. i max. odkształcenie w poszczególnych operacjach Minimum & maximum deformation in individual operations ε %		Grubość ścianki w ostatniej operacji Wall thickness in the last operation t_n [mm]	Twardość Hardness [HRA]	Chropowatość w ostatniej operacji Roughness in the last operation [μm]
			planowane planned	rzeczywiste actual			
1-4	0,6	4	20	od 19,5 do 24,7	0,72	70,6	1,8
5-9	0,7			od 17,6 do 27	0,72	71	3,19
10-14	0,6	3	30	od 28,4 do 32,5	0,68	70,3	1,64
15-18	0,7			od 27,1 do 34,8	0,7	71,8	2,35

Tablica 4. Wyniki pomiarów wyrobów ze stopu Hastelloy C-276 o grubości 3 mm po operacji zginięcia obrotowego wydłużającego

Table 4. Measurement results of 3 mm thick Hastelloy C-276 alloy after the operation of elongating flow forming

Nr próbki Sample no.	Posuw [mm/obr] Travel [mm/rev]	Ilość operacji Number of operations	Min. i max. odkształcenie w poszczególnych operacjach Minimum & maximum deformation in individual operations ε %		Grubość ścianki w ostatniej operacji Wall thickness in the last operation t_n [mm]	Twardość Hardness [HRA]	Chropowatość w ostatniej operacji Roughness in the last operation [μm]
			planowane planned	rzeczywiste actual			
1-4	0,6	4	20	od 19,3 do 25,1	1,05	70,4	1,5
5-8	0,7			od 19 do 24,9	1,08	70,7	1,83
9-13	0,6	4	30	od 26,5 do 35	0,74	70,8	1,99
14-18	0,7			od 26,5 do 35,2	0,7	71	2,62



Rys. 9. Zerwanie materiału o grubości ścianki 0,67 mm

Fig. 9. Rupture of 0.67 mm thick material

Próby przerwano po czwartej operacji zgniatania obrotowego wydłużającego, po uzyskaniu grubości ścianki 1,05 mm dla zgniotu 20%.

Całkowite odkształcenie względne określono wg wzoru:

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_n}{t_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

t_0 - grubość ścianki poboczniczy przed zgniataniem obrotowym [mm],

t_n - grubość ścianki poboczniczy po ostatniej operacji zgniatania obrotowego [mm].

Maksymalna wartość odkształcenia całkowitego dla czterech operacji zgniatania obrotowego wyliczona wg wzoru (2) dla grubości materiału 2 mm wynosiła 66%, zaś dla grubości materiału 3 mm - 76%.

Zarówno dla materiału o grubości 2 mm, jak i 3 mm podczas zgniatania obrotowego następowało odsprężynowanie materiału, stopniowe zwiększenie średnicy na całej wysokości wytłoczki (rys. 10). W skrajnym przypadku dla materiału o grubości 2 mm różnica pomiędzy średnicą zewnętrzną na dnie, a średnicą zewnętrzną na górze wytłoczki, wynosiła 5,3 mm dla zgniotu 20% oraz 6,9 mm dla zgniotu 30%. Natomiast dla materiału o grubości 3 mm różnica ta była większa i wynosiła odpowiednio 6,5 mm oraz 8,5 mm.

Podczas zgniatania obrotowego wydłużającego na całej długości wyrobu następowało nierównomierne pocienienie ścianki (rys. 11 i 12). Prawdopodobnie wynikało to z umocnienia się materiału podczas procesu kształtowania i niedostatecznej sztywności maszyny.

Na wykresach 11 i 12 literami A i B oznaczono grubość ścianki po przeciwnych stronach wyrobu, tak jak pokazano na rysunku 8.

W dalszym etapie badań przewiduje się kształtowanie stopu Hastelloy C-276 metodą zgniatania obrotowego rzutowego oraz metodą wyoblania na zimno oraz na gorąco z zastosowaniem lasera diodowego dużej mocy.

Tests were stopped after the fourth operation of elongating flow forming, after the wall thickness of 1.05 mm has been obtained for cold work of 20%.

The total has been determined according to the formula:

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_n}{t_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

where:

t_0 - *side wall thickness prior to flow forming [mm],*

t_n - *side wall thickness after the last flow forming operation [mm].*

The maximum value of total deformation for four flow forming operations calculated acc. to formula (2) was 66% for 2 mm thick material; for material thickness of 3 mm it was 76%.

Both for the 2 mm and 3 mm thickness, material springback, gradual diameter increase on the whole drawpiece height took place during flow forming (fig. 10). In an extreme case, for 2 mm thick material, the difference between the outer diameter at the drawpiece bottom and that at its top was 5.3 mm for cold work of 20% and 6.9 mm for cold work of 30%. In the case of 3 mm thick material, the difference was larger and amounted 6.5 mm and 8.5 mm, respectively.

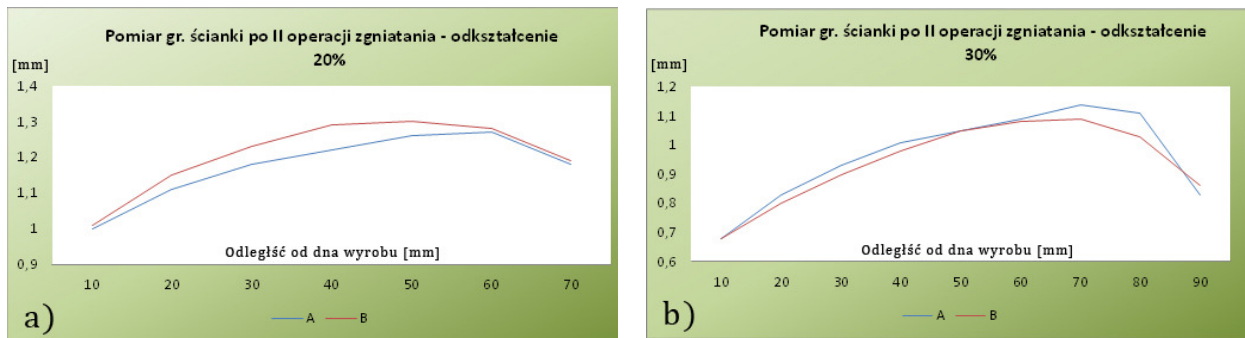
During elongating flow forming, uneven wall thinning took place along the whole height of the product (fig. 11 and 12). This was probably due to the strain hardening of the material during the process of forming and insufficient rigidity of the machine.

In curves 11 and 12, the wall thickness on the opposite sides of the product has been marked with A and B as shown in fig. 8.

In the further stage of investigation, forming of the Hastelloy C-276 by the method of shear forming is intended, as well as by the method of cold and hot spinning; the latter with the use of a high power diode laser.

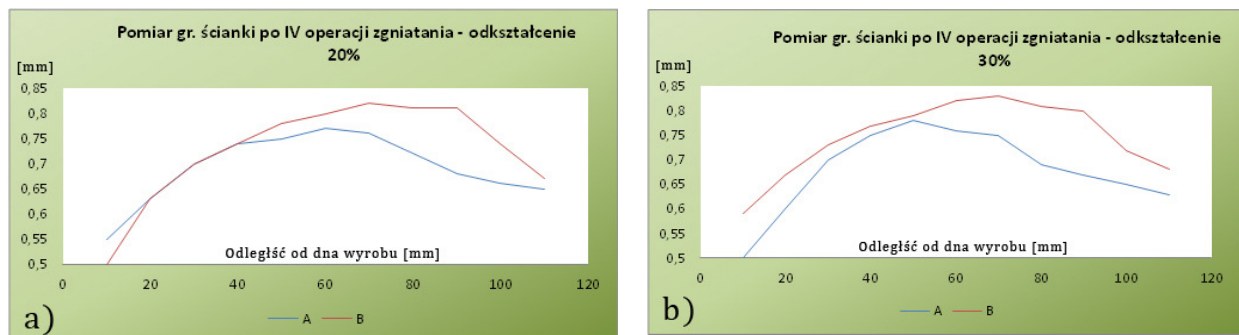


Rys. 10. Odsprężynowanie wytłoczki ze stopu Hastelloy C-276 po procesie zgniatania obrotowego
 Fig. 10. Hastelloy C-276 drawpiece springback after the process of flow forming



Rys. 11. Pomiar grubości ścianki na poboczniczy mierzony od dna wyrobu po drugiej operacji zgniatania obrotowego dla odkształcenia: a) 20% i b) 30%; A, B – przeciwległe strony wytłoczki

Fig. 11. Side wall thickness measured from the product bottom after the second operation of flow forming deformation: a) 20% and b) 30%; A, B, - opposite sides of the drawpiece



Rys. 12. Pomiar grubości ścianki na poboczniczy mierzony od dna wyrobu po czwartej operacji zgniatania obrotowego dla odkształcenia: a) 20% i b) 30%; A, B – przeciwległe strony wytłoczki

Fig. 12. Side wall thickness measured from the product bottom after the fourth operation of flow forming deformation: a) 20% and b) 30%; A, B, - opposite sides of the drawpiece

Wyniki badań przedstawione w artykule potwierdziły możliwość kształtowania stopu Hastelloy C-276 metodą tłoczenia oraz zgniatania obrotowego wydłużającego z zastosowaniem międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.

5. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania kształtowania wyrobów ze stopu Hastelloy C-276 potwierdzają możliwość kształtowania wyrobów metodami obróbki plastycznej tłoczeniem i zgniataniem obrotowym wydłużającym, z zastosowaniem międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.
2. Zastosowanie Parafinolu, jako środka smarnego znacznie poprawiło jakość powierzchni otrzymanych wytłoczek.
3. Zastosowanie 30% odkształcenia stopu Hastelloy C-276 w poszczególnych próbach zgniatania obrotowego wydłużającego oraz odpowiedniej obróbki cieplnej umożliwia uzyskanie wyrobu cylindrycznego o grubości poboczniczy 0,7 mm.
4. Przy grubości ścianki poboczniczy poniżej wartości 0,68 mm w wyrobach z blachy o grubości 2 mm następuje zrywanie materiału.
5. Wraz ze wzrostem prędkości posuwu rolki roboczej wzrasta chropowatość powierzchni wyrobu.
6. Uzyskane wyniki kształtowania na zimno wyrobów ze stopu Hastelloy C-276 z blachy o grubości 2 mm i 3 mm, świadczą o możliwości prowadzenia dalszych badań procesów obróbki plastycznej wyrobów o wydłużonych i złożonych kształtach wykonywanych z blachy ze stopów niklu i innych stopów trudno odkształcalnych.

Wyniki badań zamieszczone w artykule realizowane były z projektu badawczego własnego Nr N N507 593838, pt.: „Technologia kształtowania plastycznego złożonych wyrobów dla przemysłów: lotniczego, chemicznego i komunalnego ze stopu niklu i molibdenu Hastelloy C-276”.

The investigation results presented in the paper have proved the possibility of forming the Hastelloy C-276 by the method of stamping and flow forming with the application of interoperation heat treatment.

5. CONCLUSIONS

1. *The investigation performed proves the possibility of forming Hastelloy C-276 products by the methods of deep drawing, spinning and elongating flow forming, with the application of interoperation heat treatment.*
2. *The use of Parafinol as a lubricant has significantly improved the surface quality of the drawpieces obtained*
3. *The application of 30% deformation of Hastelloy C-276 in the individual trials of elongating flow forming, as well as adequate heat treatment makes it possible to obtain a cylindrical product with the side wall thickness of 0.7 mm.*
4. *When the side wall thickness is below 0.68 mm in a product made of 2 mm thick sheet, material rupture takes place.*
5. *With the increase of the working roller travel speed, the product surface roughness increases.*
6. *The results of cold forming products of 2 mm and 3 mm thick Hastelloy C-276 sheet prove the possibility of further investigation of the processes of plastic forming products with elongated and complex shapes made of nickel alloys and other hard-to deform ones.*

The results presented in the paper have been obtained within the Institute's own investigation project no. NN507 593838 entitled "The technology of plastic forming complex products of Hastelloy C-276 for the aircraft, chemical and municipal industries".

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Szummer A., Lublinska K.: Wpływ odkształcenia plastycznego na dyfuzję wodoru w odpornych na korozję stopach niklu. *Inżynieria Materiałowa* Nr 1/2006 s. 23-28.
- [2] Akhter J. I., Shaikh M. A., Ahmad M., Iqbal M.: Effect of aging on the hardness and impact properties of Hastelloy C-276. *Journal of Materials Science Letters* 20, 2001, 333-335.
- [3] Podaný P., Kraus L., Zrník J.: Nickel Superalloys Microstructural Changes Caused by Forming. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 2008 nr 6 s. 506-608.
- [4] Ajit K. Roy, Muhammad H. Hasan, Joydeep Pal.: Creep deformation of Alloys 617 and 276 at 750–950 °C. *Materials Science and Engineering A* 520, 2009, p. 184–188.
- [5] Sedriks A.J.: Corrosion Resistance of Austenitic Fe-Cr-Ni-Mo Alloys in Marine Environments. *International Metals Reviews*, 27, 1982, No. 6.
- [6] Certyfikat materiału Hastelloy C-276 Jacquet Spec. SM/01/PV Rev 10/31.01.2006.
- [7] Sprawozdanie końcowe z pracy BT 901.45.001.002.003.004.005.006.075055. Doskonalenie metod zgniatania obrotowego i wyoblania, wyrobów o złożonych kształtach, z głównie z materiałów trudno odkształcalnych. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 2007.
- [8] Sprawozdanie końcowe z pracy BT 901.27.001.002.003.004. 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.