

Mgr inż. Tadeusz DRENGER, mgr inż. Tomasz GADEK, mgr inż. Łukasz NOWACKI
mgr inż. Jan WIŚNIEWSKI
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

Innowacyjna technologia kształtowania obrotowego wytłoczek ze stopu niklu z miejscowym podgrzewaniem laserowym

Innovative technology of rotary forming nickel alloy drawpieces with local laser heating

Streszczenie

Ze względu na trudności w kształtowaniu plastycznym stopów niklu autorzy prowadzą badania mające na celu opracowanie optymalnych technologii podgrzewania materiału wiązką lasera w trakcie kształtowania obrotowego. Badania są prowadzone w ramach projektu rozwojowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W niniejszym artykule opisano stanowiska badawcze wraz z laserem oraz dwa sposoby kształtowania wyoblaniem i zginianiem obrotowym rzutowym na zimno i z podgrzewaniem materiału. Opisano też sposób podgrzewania i pomiar temperatury w procesie kształtowania elementów z blach ze stopu niklu Inconel 625 oraz próby zginięcia obrotowego na zimno i wyoblania z podgrzewaniem laserowym.

Abstract

Considering the difficulties met in plastic forming of nickel alloys, the authors conduct investigations aiming at optimum technologies of laser beam heating of the material during rotary forming. The investigations are effected within a development project financed by the Ministry of Science and Education. The present paper describes test stands provided with lasers and two methods of shaping by cold spinning and shear forming as well as with material heating. A description of the way of heating and temperature measurement in the process of forming parts Inconel 625 nickel alloy sheets and trials of cold flow forming and spinning with laser heating can also be found.

Słowa kluczowe: wyoblanie, zginięcie obrotowe, Inconel 625, kształtowanie obrotowe, podgrzewanie laserowe

Key words: spinning, flow forming, Inconel 625, rotary forming, laser heating

1. WSTĘP

W przemyśle lotniczym, szczególnie na elementy silników bardzo często stosowanym materiałem jest nadstop niklu o nazwie handlowej Inconel. Materiał Inconel 625 badany w ramach projektu rozwojowego R1502703 należy do materiałów trudno odkształcalnych. Używa się go ze względu na dużą odporność korozyjną i dobre właściwości wytrzymałościowe w podwyższonych temperaturach [1].

W procesach produkcyjnych obróbki plastycznej stopu niklu Inconel 625 występują graniczne odkształcenia, które nie powodują zmiany właściwości materiałowych.

1. INTRODUCTION

In the aerospace industry, an often applied material is nickel superalloy with the trade name of Inconel, particularly used for engine elements. Inconel 625 material, examined within the development project R1502703, is a hard-to-deform one. It is used for its high corrosion resistance and good strength properties at high temperatures [1].

In the production metal forming processes, there are limits of strains which can be obtained without changing material properties.

Procesy technologiczne stosowane w produkcji elementów silników z Inconelu 625 składają się z wielu operacji m.in.: gięcie, płytkie tłoczenie, zwijanie, rozpęczanie, spawanie. Powoduje to, że koszty produkcji są wysokie. Występują także duże wymagania dotyczące kontroli elementów w czasie procesu produkcyjnego. Wprowadzenie kształtowania obrotowego do wykonywania części lotniczych jest uzasadnione, ponieważ elementy silników nie są produkowane wielkoseryjnie.

Punktowy styk narzędzi z kształtowanym materiałem w procesie zgniatania obrotowego i wyoblania powoduje, że siły występujące w procesie są znacznie mniejsze niż w procesach tłoczenia. Dodatkowe wprowadzenie miejscowego podgrzewania daje szansę na osiągnięcie oczekiwanych efektów. Celem badań wykonywanych w ramach projektu jest ustalenie charakterystyki nadstopu niklu Inconel 625 w zakresie struktury i właściwości mechanicznych oraz opracowanie parametrów technologicznych obróbki cieplnej i parametrów technologicznych kształtowania obrotowego, w tym geometrii rolek roboczych. Nierozłącznie związana z badaniami tej technologii jest znajomość struktury i właściwości mechanicznych nadstopu niklu, sposobu jego obróbki cieplnej oraz rozkładu naprężeń. Badania te prowadzone są na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej. Badania te obejmują badania właściwości materiału wyjściowego, własności materiału w czasie procesu technologicznego oraz badanie własności wytłoczek próbnych.

2. BADANIA MATERIAŁOWE

W ramach badań przeprowadzono analizę składu chemicznego blach (rys. 1). W tablicy 1 przedstawiono wyniki analizy składu chemicznego blach wyznaczonego przez Politechnikę Warszawską Wydział Inżynierii Materiałowej [1].

The technological processes applied in the production of engine elements of Inconel 625 include many operations, e.g. bending, shallow stamping, coiling, bulging, welding. This results in high production costs. There are also high requirements concerning control of the elements during the production process. Introduction of rotary forming to the manufacture of aerospace engines is justified by that the engine elements are not produced in long series.

Flow forming and spinning, due to spot contact of the tools with the material being formed, results in that the forces acting in the process are much smaller than in the processes of stamping. Additional introduction of local heating makes it possible to obtain the expected effects. The objective of the investigation performed within the project is to determine the characteristics of Inconel 625 nickel superalloy in the scope of its structure and mechanical properties and to elaborate the technological parameters of heat treatment and those of flow forming, including the geometry of the working rolls. Closely related to the investigation of the technology is the knowledge of the nickel superalloy structure and mechanical properties, the way of its heat treatment and stress distribution. Those investigations are performed in the department of Material Engineering of the Warsaw University of Technology. The investigations include examination of the initial material properties, material properties during the technological process, as well as examination of the properties of test drawpieces.

2. MATERIAL INVESTIGATION

Within the investigation, an analysis of the chemical composition of the metal sheets has been performed (fig. 1). Table 1 presents the results of the chemical composition analysis determined by the Department of Material Engineering of the Warsaw University of Technology [1].



Rys. 1. Widok blach przed wycięciem próbek wraz z ich oznaczeniami używanymi w czasie badań [1]

Fig. 1. View of the sheets prior to cutting out the samples with their designations used during the investigation [1]

Tablica 1. Analiza składu chemicznego blach 1, 2, 3 [1]

Table 1. Chemical composition of sheets 1, 2, 3 [1]

Analizowane pierwiastki <i>Elements examined</i>	Zawartość pierwiastków w poszczególnych blachach użytych do badań materiałowych [%] <i>Content of elements in the individual sheets used in material investigation [%]</i>		
	blacha 1 <i>sheet 1</i>	blacha 2 <i>sheet 2</i>	blacha 3 <i>sheet 3</i>
Ni	62.76	62.58	63.34
Cr	20.25	20.12	19.87
Mo	8.510	8.401	8.858
Fe	4.79	4.69	3.92
Nb	3.309	3.270	3.229
C	0.25	0.25	0.18
Ti	0.208	0.201	0.147
Al	0.21	0.13	-
Si	0.15	0.14	0.11
Cu	0.10	0.13	0.251
Co	0.0845	0.0715	0.124

Badania materiałowe przeprowadzono wg następującego programu [1]:

- badania składu chemicznego materiału w stanie dostawy,
- badania twardości,
- badania struktury z analizą ilościową, przeprowadzone za pomocą mikroskopii świetlnej i elektronowej,
- badania jednorodności tekstury,
- badania składu fazowego,
- badania naprężeń własnych,
- próby rozciągania i wyznaczenie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego i całkowitego oraz współczynnika umocnienia.

Material investigation has been performed according to the following program [1]:

- *examination of the material chemical composition as supplied,*
- *hardness examination,*
- *structure examination including quantitative analysis performed by means of optical and electron microscopy,*
- *examination in order to homogenize the texture,*
- *examination of the phase content,*
- *examination of internal stresses*
- *tensile tests and determination of the yield point, tensile strength, even and percentage elongation as well as the coefficient of consolidation.*

Wyniki tych badań przedstawione zostaną w innej publikacji.

Z punktu widzenia kształtowania obróbką plastyczną istotne są parametry uzyskane w próbie rozciągania. Z atestu blachy nr 3 (certyfikat TW Metals) wynika, że wytrzymałość na rozciąganie wynosi $R_m = 894$ MPa, umowna granica plastyczności $R_{p0.2} = 469$ MPa, wydłużenie $A = 49,7\%$

Przykładowy wynik rozciągania próbek nr 3Wa i 3Wb pokazano na rysunku 2.

W oznaczeniu próbek pierwsza cyfra oznacza numer arkusza, z którego wycięto próbkę, litera "W" oznacza kierunek wzdłuż kierunku walcowania, a litery a i b oznaczają początkową prędkość rozciągania: (a) 10^{-3} [l/sek], (b) 10^{-1} [l/sek].

Badania materiałowe wykazują nieznaczne odchyłki $R_{p0.2}$ w stosunku do atestu natomiast wytrzymałość na rozciąganie R_m jest niższa na badanych próbkach w stosunku do atestu o ok. 50 MPa. Wartość naprężeń uplastyczniających potwierdza, że nadstop niklu Inconel 625 jest trudno odkształcalny.

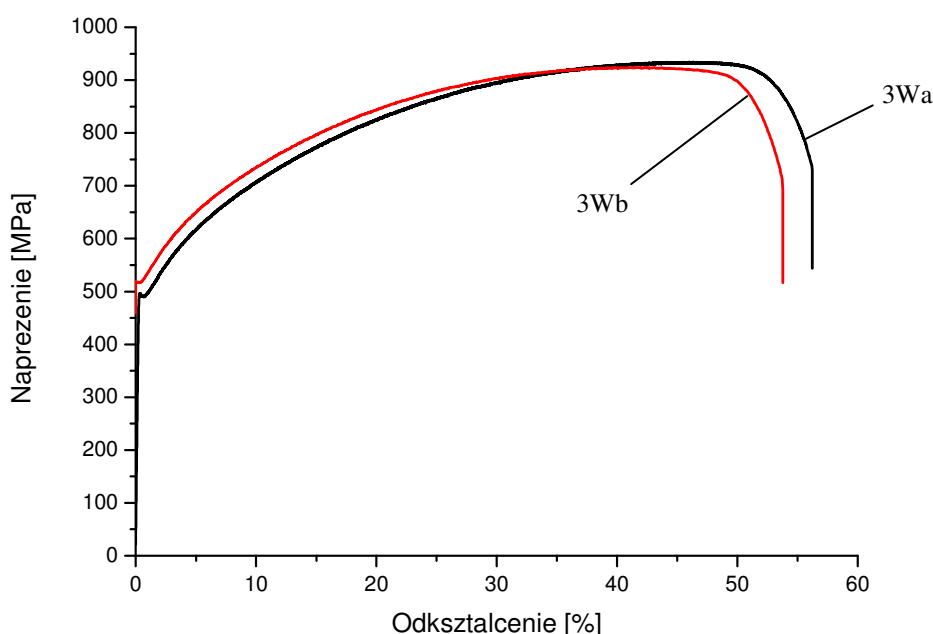
The examination results will be presented in another publication.

In respect of metal forming, the parameters obtained in the tensile test are important. The attest of material no. 3 (TW Metals certificate) indicates that its tensile strength is $R_m = 894$ MPa, proof stress $R_{p0.2} = 469$ MPa, elongation $A = 49.7\%$.

Examples of tensile test results of samples 3Wb and 3Wa can be found in figure 2.

In the sample designations, the first digit denotes the number of the sheet from which the sample has been cut out, the letter "W" denotes the direction along the direction of rolling; letters a and b denote the initial stretching speed: (a) 10^{-3} [l/sek], (b) 10^{-1} [l/sek].

Material examinations show small deviations of the $R_{p0.2}$ as compared to the attest while the tensile strength, R_m is by about 50 MPa lower in the examined samples as compared to the attest. The value of the yield stress proves that the Inconel 625 nickel superalloy is a hard-to-deform material.



Rys. 2. Krzywe rozciągania dla próbek 3Wa i 3Wb uzyskane przy prędkości rozciągania 10^{-3} [l/sek] oznaczenie (a) i 10^{-1} [l/sek] oznaczenie (b) [1]

Fig. 2. Tension curves for samples 3Wa and 3Wb obtained with stretching speed of 10^{-3} [l/sek] designation (a) and 10^{-1} [l/sek] designation (b) [1]

3. STANOWISKO DO BADAŃ TECHNOLOGICZNYCH

Stanowisko do badań technologicznych w Instytucie Obróbki Plastycznej składało się z dwóch sterowanych numerycznie maszyn. Maszyny wchodzące w skład stanowisk badawczych zostały wytworzone w Instytucie Obróbki Plastycznej [2]. Zgniatarkę obrotową MZH-400, na której prowadzone były badania zgniatania obrotowego rzutowego i wydłużającego przedstawiono na rys. 3.

Na rys. 4 przedstawiono widok układu narzędzi do wyoblania oraz układu pomiarowego wyoblarko-zgniatarki MWH-500: wzornik (1), materiał wyjściowy (2), rolka kształtująca (3), pirometr (4) głowica lasera (5), stanowisko pomiaru i rejestracji temperatury (6), monitor podglądu w kabinie, w której odbywa się proces podgrzewania laserem (7), pulpit sterowania laserem Rofin (8), monitor przedstawiający rejestrację obrazu z kamery termowizyjnej (9).

3. TECHNOLOGICAL INVESTIGATION STAND

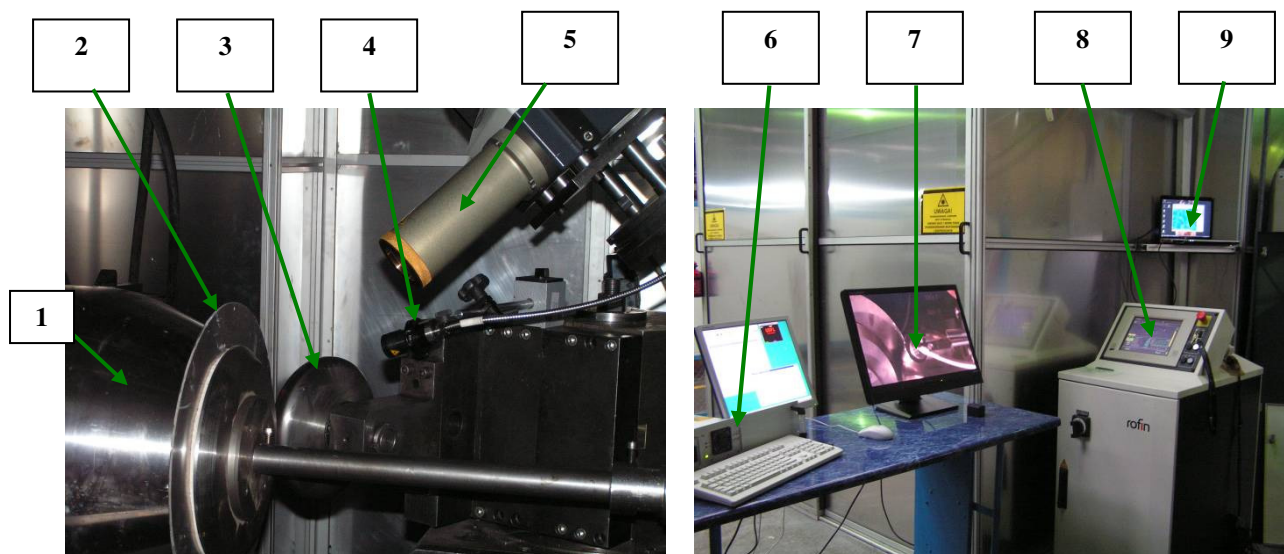
The technological investigation stand in the Metal Forming Institute consisted of two numerically controlled machines. The machines included in the investigation stands had been made in the Metal Forming Institute [2]. The rotary extrusion machine, MZH-400 on which shear forming and elongating flow forming were investigated can be seen in fig.3

Fig. 4 presents a view of the arrangement of spinning tools and the measurement system of the MWH-500 spinning and flow forming machine: mandrel (1), initial material (2), forming roll (3), pyrometer (4), laser head (5), temperature measurement and recording stand (6), monitor in the cabin where laser heating is effected (7), Rofin laser control console (8), monitor displaying image recording from the thermovision camera (9).



Rys. 3. Zgniatarka obrotowa MZH-400

Fig. 3. MZH-400 flow forming machine



Rys. 4. Narzędzia do wyoblania wraz z urządzeniem laserowym do podgrzewania oraz układ pomiarowy wyoblarko-zgniarki MWH-500

Oznaczenia: 1 – wzornik, 2 – materiał wyjściowy, 3 – rolka kształtująca, 4 – pirometr, 5 – głowica lasera, 6 – stanowisko pomiaru i rejestracji temperatury, 7 – monitor podglądu w kabinie, 8 – pulpit sterowania lasera Rofin, 9 – monitor

Fig. 4. Spinning tools together with the laser heating device and the measurement system of the MWH-500 spinning and flow forming machine

Designations: 1 – mandrel, 2 – initial material, 3 – forming roll, 4 – pyrometer, 5 – laser head, 6 – temperature measurement and recording stand, 7 – monitor in the cabinet, 8 – Rofin laser control console, 9 – monitor

4. METODYKA BADAŃ PODGRZEWANIA LASEREM I PRÓBY POMIARU TEMPERATURY

Jedną z podstawowych czynności niezbędnych do rozpoczęcia prób podgrzewania laserem było wyznaczenie współczynnika odbicia R dla badanego materiału oraz ustalenie zdolności absorpcyjnej $A = 1 - R$ wg odpowiednich tablic [2,3,4,5,6]. Współczynnik emisyjności do ustawienia pirometru przyjęto w wysokości 0,3 [7].

Wpływ na emisyjność i wartość współczynnika emisyjności mają: rodzaj nagrzewanego materiału, jakość powierzchni, stopień utlenienia powierzchni i dodatkowo czynnik smarujący, który ma za zadanie zwiększenie współczynnika absorpcji.

Pomiary temperatury przeprowadzono za pomocą:

- Termopary (w przypadku prób statycznych),
- Pirometru Standard ST-8855 infraRed&K-Type o zakresie od -50 do 1370°C ,
- Pirometru Marathon- MC1-C firmy Raytek z plamką pomiarową około 1 mm [7],

4. LASER HEATING METHODOLOGY AND TEMPERATURE MEASUREMENT TESTS

One of the basic tasks necessary to start the tests of laser heating was the determination of the reflection coefficient, R , for the material under examination and establishment of its absorbing capacity, $A = 1 - R$, according to the adequate tables [2, 3, 4, 5, 6]. The emissivity factor of 0.3 has been adopted for setting of the pyrometer [7].

The emissivity and emissivity factor are influenced by: the kind of material being heated, surface quality, the degree of surface oxidation and, additionally, the lubricant whose task is to increase the absorbing capacity.

The temperature measurements have been performed by means of:

- A thermocouple (in the case of static tests),
- A Standard ST-8855 infraRed&K-Type pyrometer with the range of -50 up to 1370°C ,
- A Marathon- MC1-C pyrometer made by Raytek, with a measurement spot of about 1 mm [7],

- Pirometru firmy Lascon LPC 03 dedykowanego do lasera Rofin z głowicą firmy Lascon i plamką pomiarową około 1,5 mm [10].

Termopara służyła w niższych temperaturach do porównania temperatur z pirometrem standard-8855. Stosowanie jej ze względu na podłączone przewody nie jest możliwe w przypadku obracającego się podgrzewanego obiektu.

Piometr Standard ST-8855 nie dawał wyników oczekiwanych ponieważ plamka pomiarowa była zbyt duża, większa od strefy podgrzewanej. Ponadto piometr musi być położony bardzo blisko strefy pomiaru, a takie ustawienie utrudnia przebieg procesu i celność wiązki pirometru.

Piometr firmy Raytek z plamką pomiarową 1mm jest urządzeniem dokładnym ale w przypadku pomiarów statycznych. Przy przemieszczaniu się wraz z głowicą lasera piometr nie nadążał z odczytem optymalnym temperatur i wyniki nie były miarodajne.

Właściwym do badań temperatury okazał się piometr firmy Lascon LPC 03 dedykowany do lasera Rofin z głowicą firmy Lascon i plamką pomiarową około 1,5 mm. Piometr ten dawał najbardziej powtarzalne wyniki, niemniej jednak przed przystąpieniem do pomiaru pirometrem firmy Lascon z głowicą Rofin przeprowadzono wzorcowanie [10].

Wzorcowanie przeprowadzono przy podłączeniu pirometru do głowicy laserowej i obiektem obserwowanym, którym był piec laboratoryjny z możliwością ustawiania precyzyjnego temperatury. Na rys. 5 przedstawiono stanowisko do skalowania pirometru wraz z głowicą lasera firmy Rofin DL 036R. Na rysunku 5 oznaczono: stanowisko pomiaru i rejestracji temperatury (1), piometr firmy Lascon (2), głowica lasera firmy Rofin (3), piec laboratoryjny (4), próbka do wzorcowania temperatury (5).

Na przedstawionym stanowisku wyskalowano w temperaturze 700, 800, 900 i 1000 °C piometr wraz z głowicą laserową firmy Rofin DL 036R i uzyskano błąd pomiaru w stosunku do rzeczywistej temperatury mniejszy niż 2%.

- *An LPC 03 pyrometer made by Lascon dedicated to Rofin laser with a Lascon head and the measurement spot of about 1.5 mm [10].*

The thermocouple, at lower temperatures, served for comparing the temperatures to those of the Standard-8855 pyrometer. Due to the cables connected to it, the thermocouple cannot be used if the heated object is rotating

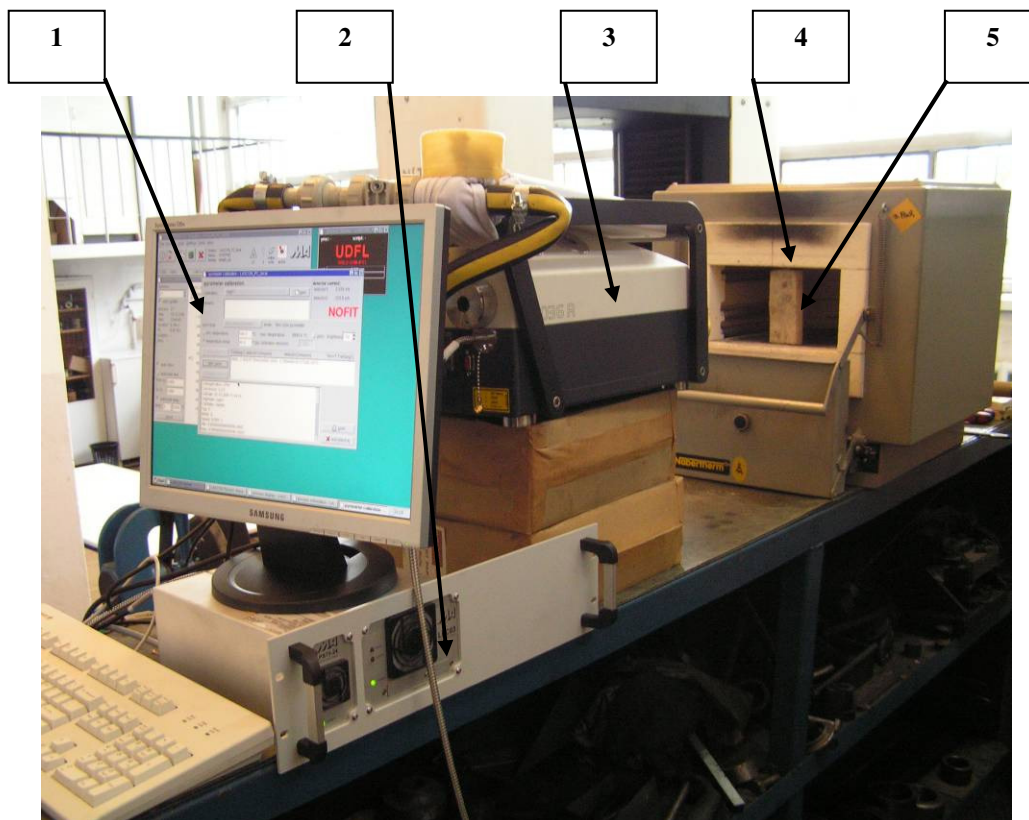
The Standard ST-8855 pyrometer did not render expected results because the measurement spot was too large, larger than the heated zone. What's more, the pyrometer must be located very near to the measurement zone, which arrangement makes the process and precise incidence of the pyrometer beam difficult.

Raytek pyrometer with its measurement spot of 1 mm is a precise device but in the case of static measurements. When moving together with the laser head, the pyrometer could not perform optimum temperature reading on time and the results were not reliable.

The suitable device for temperature measurement proved to be the LPC 03 pyrometer dedicated to Rofin laser with Lascon head and a measurement spot of about 1.5 mm. This pyrometer rendered the most repeatable results, nevertheless, calibration has been performed prior to measurement with the Lascon pyrometer with Rofin head [10].

Calibration has been performed with the pyrometer connected to the laser head and the observed object which was a laboratory furnace with a possibility of accurate temperature setting. Fig. 5 presents a stand for pyrometer scaling together with Rofin DL 036R laser head. Designations: temperature measurement and recording stand (1), Lascon pyrometer (2), Rofin laser head (3), laboratory furnace (4), a sample for temperature calibration (5).

In the stand being presented, the pyrometer, together with Rofin DL 036R laser head have been scaled at 700, 800, 900 and 1000 °C an error below 2% as compared to the true temperature has been obtained.



Rys. 5. Stanowisko do skalowania pirometru wraz z głowicą lasera firmy Rofin DL 036R
 Oznaczenia: 1 - stanowisko pomiaru i rejestracji temperatury, 2 - pirometr firmy Lascon, 3 - głowica lasera firmy Rofin,
 4 - piec laboratoryjny, 5 - próbka do wzorcowania temperatury

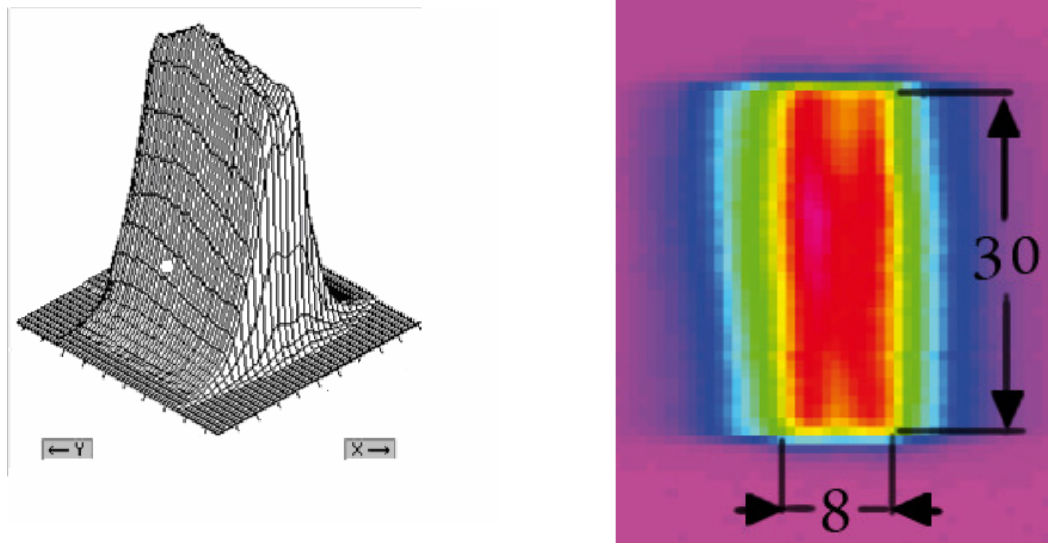
*Fig. 5. A stand for scaling the pyrometer together with Rofin DL 036R laser head
 Designations: 1 – temperature measurement and recording stand, 2 – Lascon pyrometer, 3 – Rofin laser head,
 4 – laboratory furnace, 5 – temperature calibration sample*

Objętościowa gęstość mocy promieniowania pochłanianego zmienia się w ciele stałym wg prawa Bougera [3], ale jest też wiele innych czynników decydujących o rozkładzie temperatury w materiale w wyniku oddziaływania wiązki lasera.

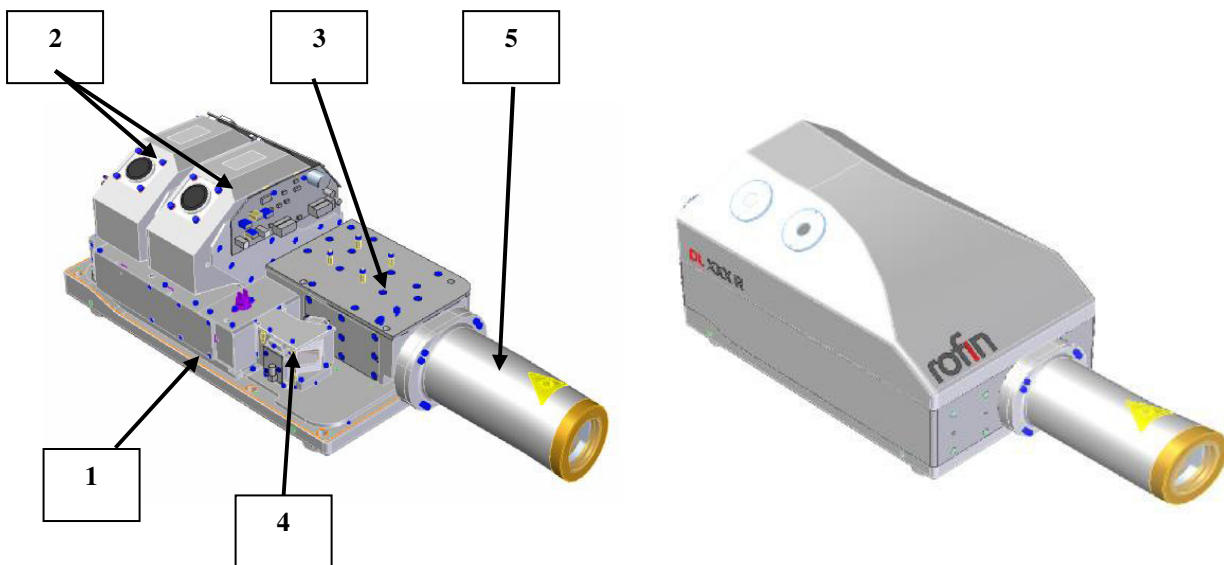
Na podstawie prowadzonych prób uzyskano konieczne parametry nagrzewania i miejsce położenia plamki lasera w stosunku do położenia rolki wyoblającej. Promień pirometru ustawiony był dokładnie na środek plamki lasera. Laser diodowy, za pomocą którego przeprowadzone zostały próby grzania wyposażony jest w wymienną optykę o plamce 6x20 i 8x30mm. Do badań została wykorzystana optyka o większej plamce ze względu na możliwość podgrzewania większego obszaru podczas kształtowania. Rozkład przestrzenny laserowego impulsu przedstawiono na rys. 6, wraz z wyglądem plamki lasera [5].

Volumetric power density of the absorbed radiation in a solid body varies according to Bouger-Lambert law [3] but there are many other factors determining the temperature distribution in the material as result of the action of a laser beam.

Basing on the tests performed, the necessary heating parameters and the laser spot location in relation to the spinning roll have been obtained. The pyrometer ray has been set precisely to the middle of the laser spot. The diode laser used in the heating tests is equipped with exchangeable optics with the spot of 6x20 and 8x30 mm. The one with larger spot has been used in the investigation due to the possibility of heating a larger area during forming. Spatial distribution of the laser impulse has been shown in fig. 6 including the appearance of the laser spot [5].



Rys. 6. Rozkład przestrzenny natężenia impulsu laserowego (gaussowski) i wygląd plamki lasera [5]
 Fig. 6. Spatial (Gaussian) distribution of the laser impulse intensity and the laser spot appearance [5]

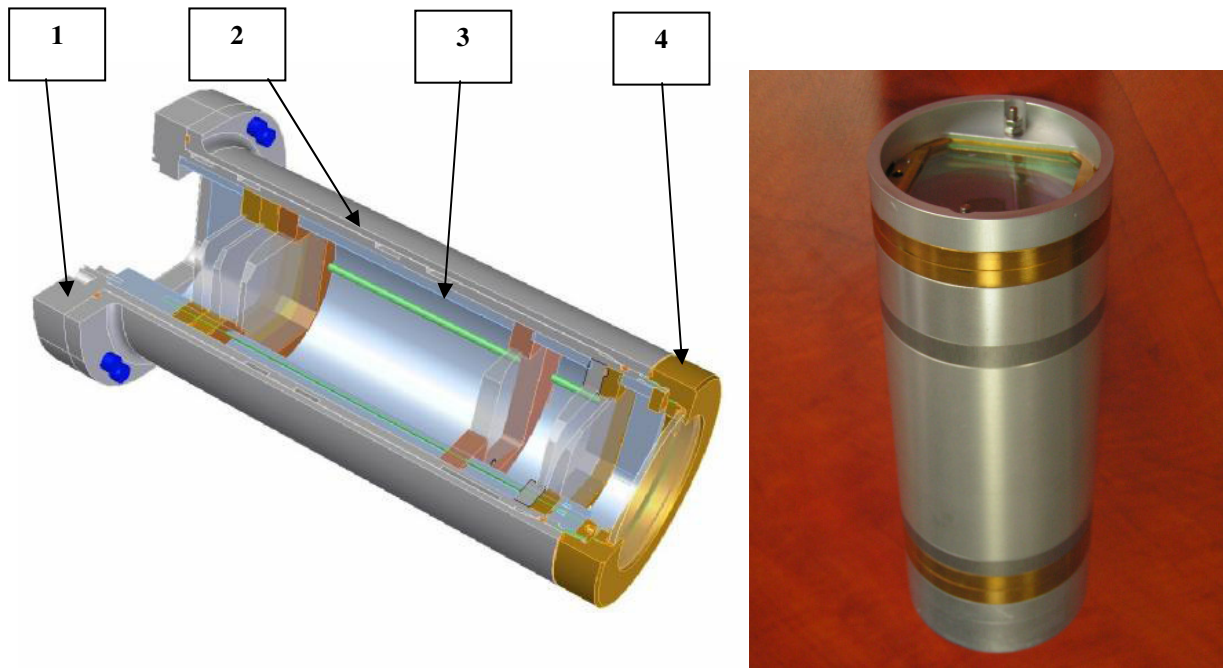


Rys. 7. Głowica lasera użytego do badań podgrzewania przy kształtowaniu obrotowym stopu niklu Inconel 625 [5]
 Oznaczenia: 1 – płyta podstawowa, 2 – stosy diod, 3 – homogenizer, 4 – urządzenie pomiaru mocy, 5 – oprawka z soczewkami ogniskującymi

Fig. 7. The head of the laser used in the investigation of heating in rotary forming of Inconel 625 nickel alloy [5]
 Designations: 1 – foundation plate, 2 – diode files, 3 – homogenizer, 4 – power measurement device, 5 – focusing lens holder

W przypadku laserów diodowych dużej mocy podstawą całego urządzenia jest głowica laserowa, która przedstawiona jest na rys. 7. Na płycie podstawowej (1) umieszczone są stosy diod (2). Światło ze stosów diod jest kierowane poprzez homogenizer (3) i oprawkę z soczewkami ogniskującymi (5), która przedstawiona jest na rys. 8. Moc lasera mierzona jest za pomocą urządzenia pomiaru mocy (4).

In the case of high power diode lasers, the essential part of the whole device is the laser head (to be seen in fig. 7). On the foundation plate (1), files of diodes (2) are located. Light from the diode files is directed, through the homogenizer (3) and the holder with focusing lenses (5) which is shown in fig. 8. The laser power is measured by means of the power measurement device (4).



Rys. 8. Oprawka z soczewkami do lasera Rofin DL036R [5]

Oznaczenia: 1 – przyłącze do lasera, 2 – płaszcz chłodzący, 3 – wymienna oprawka z zestawem soczewek, 4 – pokrywa przytrzymująca

Fig. 8. Lens holder for laser RofinDL036R [5]

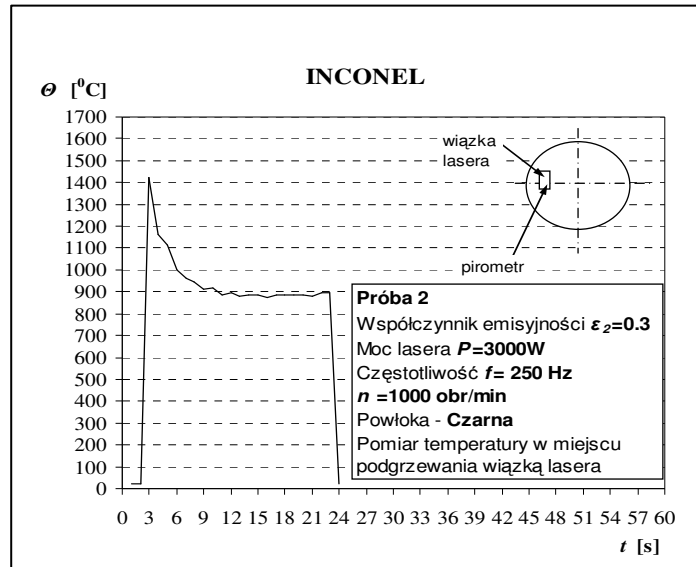
Designations: 1 – connection to the laser, 2 – cooling jacket, 3 – exchangeable holder with a set of lenses, 4 – fixing cover

Oprawka z soczewkami ogniskującymi przedstawiona na rys. 8 składa się z przyłącza do lasera (1), z płaszczem chłodzącym (2), wymiennej oprawki z zestawem soczewek (3) i pokrywy przytrzymującej (4). Przedstawiony układ soczewek pozwala na uzyskanie plamki prostokątnej. Jest to szczególnie przydatne w kontekście zastosowania lasera do podgrzewania w procesach kształtowania rollkami.

Przykładowy wynik pomiaru temperatury pirometrem Lascon pokazano na rys. 9. Stosowano współczynnik emisyjności 0,3 przyjęty na podstawie tabeli emisyjności uwzględniający gatunek materiału [7].

The focusing lens holder shown in fig. 8 consists of a connection to the laser (1), a cooling jacket (2), an exchangeable holder with a set of lenses and a fixing cover (4). The presented lens arrangement allows for obtaining a rectangular spot. It is particularly useful in respect of laser application for heating in the processes of forming by rolls.

An example of the result of temperature measurement by Lascon pyrometer has been shown in fig. 9. The emissivity factor of 0.3 has been adopted on the basis of the table considering the material grade [7].



Rys. 9. Rozkład temperatury w czasie grzania w miejscu padania wiązki laserowej

Fig. 9. Temperature distribution during heating at the point of the laser beam incidence

5. PRÓBY TECHNOLOGICZNE PROCESU ZGNIATANIA OBROTOWEGO

Próby z laserowym podgrzewaniem materiału przeprowadzono, ponieważ w procesie kształtowania na zimno nie uzyskano zadowalających wyników.

W czasie wstępnych prób zmieniano parametry imitujące proces technologiczny, dobierając najlepsze parametry lasera, tak, aby wynik pomiaru temperatury odpowiadał temperaturze wyznaczonej w czasie badań materiałowych, a jednocześnie uwzględniał zalecenia producentów materiału w zakresie obróbki na gorąco.

Serie prób rozpoczęto na krążku blachy umieszczonym na nieruchomym wzorniku. Pomiar temperatury termoparą wykonywano na odwrotnej stronie grzanego materiału i porównywano wyniki z odczytem z pirometru. Pozwoliło to sprawdzić dokładność odczytu z pirometru i uzyskać wyjściowe dane do dalszych prób technologicznych.

Po określeniu optymalnych temperatur dla kształtowania i przyjęciu założonych parametrów, którymi były grubość ścianki kształtowanego wyrobu z Inconelu 625, obroty wrzeciona, szybkość przesuwu rolki kształtującej przy założonej temperaturze podgrzewania 950 °C, rozpoczęto próby technologiczne.

5. TECHNOLOGICAL TESTS OF THE FLOW FORMING PROCESS

The tests with laser material heating have been performed because the process of cold forming has not brought satisfactory results.

In the initial trials, the parameters imitating the technological process have been changed while selecting the best parameters of the laser so that the temperature measurement result corresponded to that determined during material investigations and met the recommendations of the material producers concerning hot processing.

The series of trials has been started on a metal sheet disk placed on an immobile mandrel. Temperature measurements have been performed by means of a thermocouple on the opposite side of the material and compared to the pyrometer reading. This has allowed us to check the accuracy of the pyrometer reading and to obtain the initial data for further technological tests.

Once the optimum temperatures for forming have been determined and the assumed parameters (Inconel 625 product wall thickness, spindle speed, forming roll travel speed at the assumed heating temperature of 950 °C) adopted, the technological tests were started.

Schemat procesu kształtowania obrotowego, wraz z podgrzewanym materiałem pokazano na rysunku 10, gdzie: (1) krążek materiału, (2) dociśnięty dociskaczem do wzornika w początkowej fazie podgrzewania materiału. Na krążku materiału widać plamkę promienia laserowego (3) i rolkę kształtującą (4).

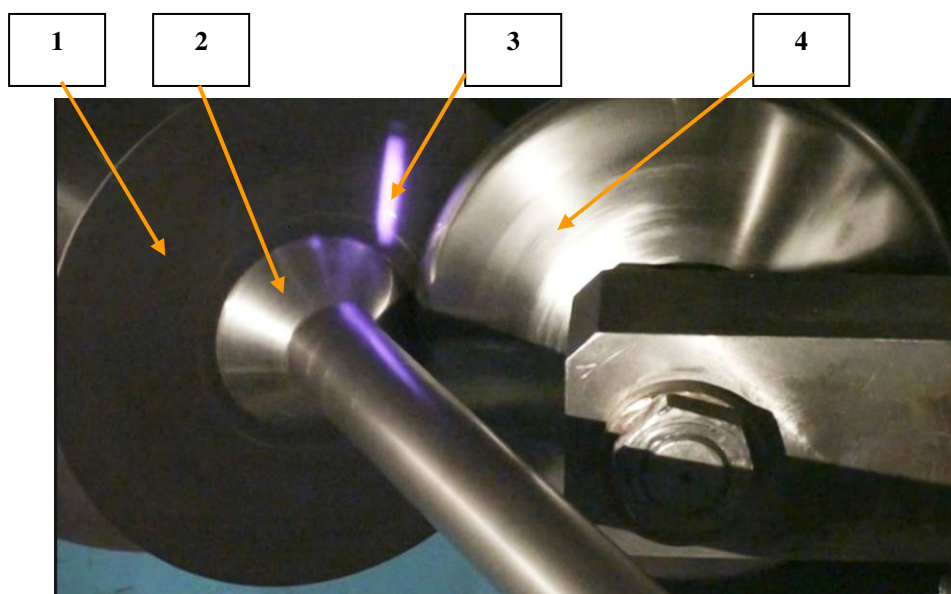
Badania technologiczne prowadzone były na dwóch stanowiskach badawczych pokazanych na rys. 3 i 4. Ze względu na rozmiar prowadzonych badań wyniki zgniatania obrotowego wydłużającego będą przedstawione w innych publikacjach. W niniejszym artykule przedstawiono jedynie wyniki prób wyoblania i zgniatania obrotowego rzutowego części stożkowych uważanych za najtrudniejsze do kształtowania.

Próby zgniatania obrotowego rzutowego wytłoczki wykonano przy kącie pochylenia pobocznic $\alpha = 45^\circ$. Kryterium uzyskania pozytywnego wyniku było otrzymanie wytłoczki bez pęknięć i rozwarstwień materiału, uzyskanie założonej grubości ścianki pobocznicy. Oceniano także stopień przylegania ścianki do wzornika. Określało to wielkość odsprężynowania materiału po zgniataniu obrotowym rzutowym.

A diagram of the flow forming process, together with the material being heated, has been shown in fig. 10 where: (1) a disk of material, (2) pressed by the holder to the mandrel at the beginning of material heating. On the material disk, the spot of the laser ray (3) and the forming roll (4) can be seen.

The technological investigation has been performed on two stands shown in figs 3 and 4. Due to the size of the investigation being performed, the results of elongating flow forming will be presented in other publications. This paper presents only the results of the tests of spinning and shear forming of conical parts which are considered to be the most difficult to form.

The trials of drawpiece shear forming have been performed with the side wall inclination angle of $\alpha = 45^\circ$. The criterion of positive result was obtaining of a drawpiece without cracks and material delamination and the desired side wall thickness. The degree of the wall adhesion to the mandrel has also been assessed. This has determined the magnitude of the material springback after shear forming.



Rys. 10. Widok części roboczej stanowiska badawczego do badania procesu wyoblania z laserowym podgrzewaniem
Oznaczenia: 1 - krążek materiału, 2 - dociśnięty dociskaczem do wzornika w początkowej fazie podgrzewania materiału, 3 - plamka promienia laserowego, 4 - rolka kształtująca

*Fig. 10. A view of the working part of the stand for investigating the process of spinning with laser heating
Designations: 1 - material disk, 2 - pressed by the holder at the initial phase of material heating, 3 - laser beam spot, 4 - forming roll*

W przypadku materiału użytego do badań o grubości $t_0 = 2,3$ mm wyniki uzyskano zgodnie z przyjętą zasadą:

$$t = t_0 \sin \alpha$$

gdzie:

- t - grubość materiału po zgniataniu obrotowym rzutowym,
- t_0 - grubość materiału wyjściowego,
- α - połowa kąta rozwarcia stożka.

Grubość ścianki po zgniataniu obrotowym rzutowym na zimno wynosiła 1,63 mm.

Pomiarów dokonywano przy pomocy grubościomierza z sondą ultradźwiękową.

Pomiarów grubości dokonywano wzdłuż tworzącej stożka od średnicy mniejszej do większej (rys. 11). Wzrastająca grubość ścianki jest wynikiem znacznego umocnienia się materiału w trakcie kształtowania na zimno. Wskazuje to na znaczny wzrost sił technologicznych w czasie procesu zgniatania obrotowego i potwierdza ograniczone możliwości kształtowania Inconelu 625 na zimno. Wyniki pomiarów grubości ścianki stożka wyrobu po zgniataniu obrotowym na zimno przedstawiono w tabelicy 2 i pokazano rys. 12.

In the case of the material used in the investigation with the thickness of $t_0 = 2.3$ mm, the results were obtained in accordance with the adopted formula:

$$t = t_0 \sin \alpha$$

where:

- t – material thickness after shear forming,
- t_0 – thickness of the initial material,
- α – half of apex angle of the cone.

The wall thickness after cold shear forming was 1.63 mm.

The measurements have been performed by means of a thickness gauge with an ultrasonic probe.

The thickness measurements have been performed along the cone generatrix from the smaller diameter to the larger one (fig. 11). The increasing wall thickness results from significant material consolidation during cold forming. This indicates a significant increase of technological forces during the process of flow forming and proves the limited possibilities of cold forming Inconel 625. The results of the wall thickness measurements of an Inconel 625 cone after cold flow forming have been presented in table 2 and shown in fig. 12.

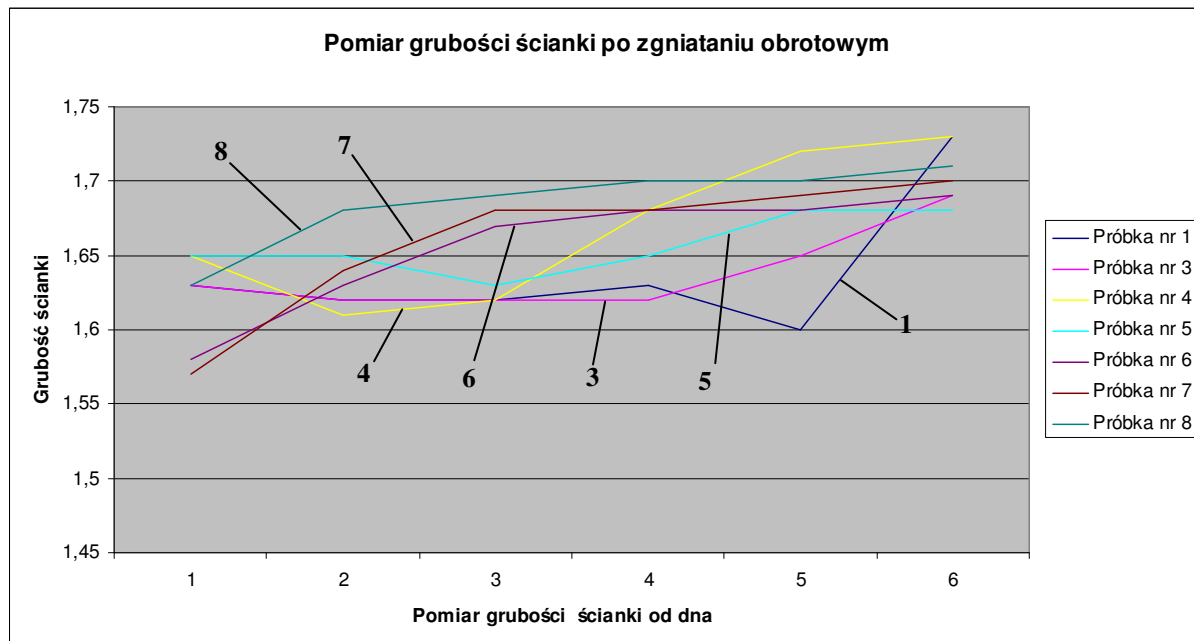


Rys. 11. Badanie grubości ścianki wytłoczki za pomocą grubościomierza z sondą ultradźwiękową
Oznaczenia: 1-6 – punkty pomiarowe

*Fig. 11. Examination of the drawpiece wall thickness by means of a thickness gauge with an ultrasonic probe
Designations: 1 - 6 - measurement points*

Tablica 2. Wyniki pomiaru grubości ścianki stożka z Inconelu 625 po operacji zginięcia obrotowego
 Table 2. The results of Inconel 625 cone wall thickness measurement after the operation of flow forming

Grubość ścianki stożka wyrobu po zginięciu obrotowym na zimno (mm) Wall thickness of the product cone after cold flow forming (mm)								
Punkt pomiarowy Point of measurement	Numer próbki Sample number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,63	1,02	1,63	1,65	1,65	1,58	1,57	1,63
2	1,62	1,2	1,62	1,61	1,65	1,63	1,64	1,68
3	1,62		1,62	1,62	1,63	1,67	1,68	1,69
4	1,63		1,62	1,68	1,65	1,68	1,68	1,7
5	1,6		1,65	1,72	1,68	1,68	1,69	1,7
6	1,73		1,69	1,73	1,68	1,69	1,7	1,71
uwagi notes		zerwanie na krawędzi rolki rupture on the roll edge						



Rys. 12. Zmiana grubości ścianki stożkowa wyrobu z materiału Inconel 625 po zginięciu obrotowym na zimno
 Fig. 12. The change of the Inconel 625 conical product wall thickness after cold flow forming

W przeglądzie literatury z zakresu kształtowania obrotowego blach [8] umieszczono informację o miejscowym podgrzewaniu laserowym przy kształtowaniu obrotowym blach. W innej publikacji [9] opisano proces kształtowania obrotowego stożków ze stopu aluminium w specjalnej kabinie, do której transportowane jest gorące powietrze, które nagrzewa materiał kształtowany i narzędzia. Za pomocą gorącego powietrza nie da się jednak podgrzać materiału do temperatury obróbki na gorąco.

The survey of literature concerning rotary forming of sheet metal [8] contains information on local laser heating in flow forming of sheets. In another publication [9], the process of flow forming of aluminium alloy cones in a special cabinet to which hot air is supplied to heat the material being formed and the tools. Hot air, however, cannot heat the material up to the temperature of hot forming. There is a possibility to heat the roll working zone by means of oxy-acetylene blowpipes.

Istnieje jeszcze możliwość podgrzewania strefy pracy rolek za pomocą palników acetylenowo tlenowych. Obszar podgrzewania jest jednak bardzo duży, a konstrukcja zespołu narzędziowego maszyny do wyoblania jest skomplikowana.

W Instytucie Obróbki Plastycznej w minionych latach wykonano maszynę dla Premy Milmet Sosnowiec, do obciskania na gorąco szyjek butli wysokociśnieniowych. Natomiast w roku 2009 w Instytucie podjęto nowe badania technologii kształtowania obrotowego z podgrzewaniem laserowym.

Na rys. 13 przedstawiono próbkę po pierwszym zabiegu wyoblania z podgrzewaniem laserowym materiału wyjściowego ze stopu Inconel 625. W badaniach tych wykorzystano optymalne parametry kinematyczne i geometrię rolki uzyskane w procesie zgniatania obrotowego rzutowego na zimno.

W tabelicy 3 przedstawiono wyniki pomiarów kształtu wytłoczki ze stopu Inconel 625 przedstawionej na rys. 11. W tabelicy podano również zastosowane parametry maszyny, przy których wytłoczka była wykonywana. Kształtowanie odbywało się z miejscowym podgrzewaniem laserowym materiału podczas wyoblania.

Parametry technologiczne zarówno urządzenia laserowego, jaki i wyoblarki sterowanej numerycznie zostały dobrane doświadczalnie.

Na podstawie dotychczasowych badań procesu wyoblania zrealizowanych w ramach prac statutowych opracowano przykładową trajektorię sterowania rolką wg schematu pokazanego na rys. 14.

However, the heating area is very large and the design of the spinning machine tool set is complex.

In the past years, a machine for hot crimping of high pressure bottle necks for Prema Milmet Sosnowiec has been made in the Metal Forming Institute. In 2009, the Institute has undertaken new investigation of rotary forming with laser heating.

Fig. 13 shows a sample after the first operation spinning with laser heating of Inconel 625 initial material. In that investigation, the optimum kinematic parameters and roll geometry obtained in the process of cold shear forming have been used.

Table 4 presents the results of measurements of the Inconel 625 drawpiece shown in fig. 11. The table shows also the machine parameters applied with which the drawpiece has been made. Forming has been effected with local laser heating of the material during spinning.

Both the technological parameters of the laser device and those of the numerically controlled spinning machine have been experimentally selected.

Basing on the spinning process investigation performed so far within the statute works, roll control trajectories have been elaborated according to the scheme shown in fig. 14.

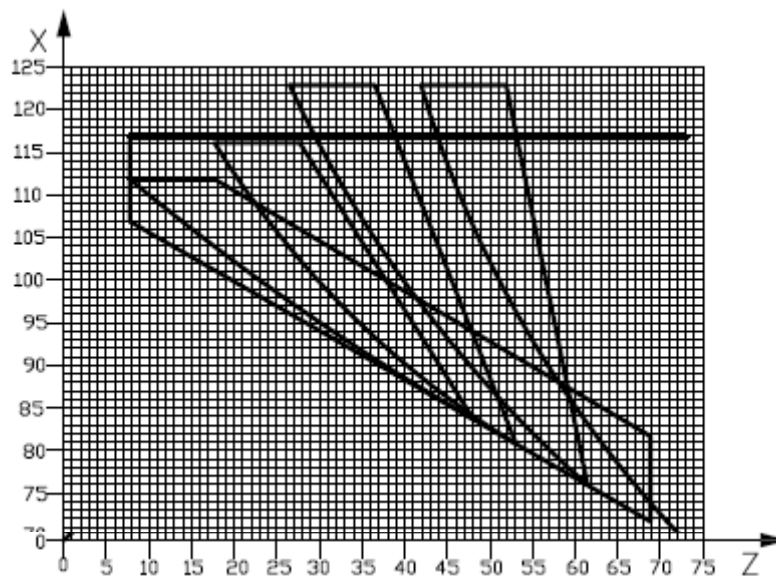


Rys. 13. Próbkę po pierwszym zabiegu wyoblania z podgrzewaniem laserowym

Fig. 13. A sample after the first operation of spinning with laser heating

Tablica 3. Wyniki pomiarów kształtu wytłoczki
 Table 3. Drawpiece shape measurement results

Nr próby <i>Test no.</i>	Parametry kształtowania obrotowego <i>Rotary forming parameters</i>			Mierzone wymiary wytłoczki <i>Measured drawpiece dimensions</i>	
	Posuw [mm/min] <i>Travel</i> [mm/min]	Obroty [obr/min] <i>Speed</i> [rpm]	Nazwa programu <i>Program name</i>	Kąt pochylenia pobocznic α [°] <i>Side wall inclination angle,</i> α [°]	Średnia grubość ścianki stożka [mm] <i>Average thickness of the cone wall</i> [mm]
Inconel 625					
1	500	1000	Trajektoria wyoblania 1	53	1.38
2			Trajektoria wyoblania 2	51	1,36
3				54	1,39
4	300	1000	Trajektoria wyoblania 1	51	2,28
5				52	2,20
6			Trajektoria wyoblania 2	53	2,24



Rys. 14. Trajektoria sterowania rolką wyoblarki przedstawiona w formie graficznej
 Fig. 14. Roll control trajectories (grafic visualisation)

Pomiarów kąta pochylenia pobocznic - α - na wytłoczce dokonano w celu określenia kąta odsprężynowania materiału po kształtowaniu w stosunku do kąta zaprogramowanego w programie sterującym. W procesie kształtowania na gorąco występuje odsprężynowanie materiału max 4° , które będzie przedmiotem dalszych badań.

The side wall inclination angle, α , has been measured on the drawpiece in order to find the angle of material springback after forming as related to the angle set in the control program. In the hot forming process, the maximum springback of the material is 4° . The springback will be the object of further investigations.

6. PODSUMOWANIE

- Wstępne wyniki badań kształtowania obrotowego z podgrzewaniem laserem nadstopu niklu Inconel 625 wykazują możliwość zastosowania lasera Rofin DL036R do podgrzewania materiału w procesie kształtowania obrotowego.
- Ze względu na miejscowy kontakt narzędzi w czasie wyoblania i zgniatania obrotowego zastosowanie technologii kształtowania rolkami daje możliwość uzyskania większych odkształceń niż przy tłoczeniu.
- W wyniku prowadzonych badań uzyskano wyroby próbne o odkształceniach mniejszych niż w przypadku kształtowania porównywalnych materiałów ze stali nierdzewnej austenitycznej i stali żaroodpornych.
- Przewiduje się wykonanie kolejnej serii badań procesu wyoblania z podgrzewaniem laserem dla wyrobów stosowanych w przemyśle lotniczym.
- Wyniki tych badań będą podstawą do zaprojektowania i wykonania nowych specjalistycznych maszyn do kształtowania określonych wyrobów. Będą to maszyny o zwartej budowie, z chłodzonymi narzędziami, wyposażone w osłony przed promieniowaniem laserowym i rozproszonymi promieniami odbitymi.

Praca realizowana w ramach projektu rozwojowego nr R 1502703 pt.: „Technologia kształtowania plastycznego części silników lotniczych z nadstopu niklu z zastosowaniem zgniatania obrotowego i wyoblania”.

6. SUMMARY

- *The initial results of investigation of rotary forming with laser heating of Inconel 625 nickel superalloy indicate the possibility of using the Rofin DL036R laser for material heating in the process of rotary forming.*
- *Due to the local contact of the tools during spinning and flow forming, the application of the technology of forming by rolls makes it possible to obtain larger deformations than in stamping*
- *As result of the investigation performed test products with smaller strains than in the case of forming comparable materials of stainless austenitic steel and heat-resisting steels*
- *A further series of investigations of the process of spinning with laser heating for products used in the aerospace industry is intended*
- *The results of those investigations will be a basis for the design and execution of new special machines for forming definite products. Those will be machines of compact construction, with cooled tools, provided with shields against laser radiation and dispersed reflected rays.*

The work is carried on within the development project no. R 1502703 entitled: “ The technology of plastic forming of aerospace engine parts of nickel superalloy with the application of flow forming and spinning”.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Pakieła Z., Lewandowska M., Molak R.: Charakterystyka nadstopu niklu Inconel 625 w zakresie struktury i właściwości mechanicznych. Raport nr 1/2008 Etap 1. Politechnika Warszawska s. 36.
- [2] Raport roczny z projektu nr R1502703: Technologia kształtowania plastycznego części silników lotniczych z nadstopów niklu z zastosowaniem procesów zgniatania obrotowego i wyoblania. Poznań 2010 s. 30.
- [3] Jewtuszenko A., Matysiak S.J., Roźniakowska M.: Temperatura i naprężenia termiczne spowodowane oddziaływaniem laserowym na materiały konstrukcyjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej Białystok 2009.
- [4] Ziętek B.: Lasery. Wydawnictwo naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika wydanie II Toruń 2009.
- [5] Rofin DL 036 R, Oryginalna Instrukcja Obsługi, Hamburg 2008, s.140.
- [6] Jankowiak M., Przystacki D.: Raport z badań wstępnych pomiaru temperatury, Poznań 2008, s. 13.
- [7] Table of total emissivity firmy Monarchinstrument www.monarchinstrument.com.
- [8] Music O., Allwood J.M., Kawai K.: A review of mechanics of metal spinning. *Jurnal of Materials Processing Technology* 210 (2010) p. 3-23.

- [9] Ken-ichiro Mori, Minoru Ishiguro, Yuta Isomura: Hot shear spinning of cost aluminium alloy parts. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), p. 3621-3627.
- [10] Lascon Manuals for Software and Hardware, Oryginalna Instrukcja Obsługi, Germany 2009, s. 74.