

dr inż. Tomasz GADEK, mgr inż. Łukasz NOWACKI, mgr inż. Tadeusz DRENGER
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
E-mail: gadek@inop.poznan.pl

Wyoblanie na gorąco stopu Hastelloy C-276 z zastosowaniem lasera diodowego dużej mocy

Hot spinning of the Hastelloy C-276 alloy using a high-power diode laser

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wyoblania na gorąco z zastosowaniem lasera diodowego dużej mocy. Ponadto opisano sposób wyznaczania emisyjności dla stopu Hastelloy C-276. Przedstawiono wyniki badań statycznej próby rozciągania na gorąco oraz badania nad doбором odpowiedniej temperatury grzania stopu niklu podczas wyoblania na gorąco. Uzyskane wyniki badań porównano z wynikami wyoblania na zimno stopu Hastelloy C-276.

Abstract

In this article are presented the results of research on hot spinning using a high-power diode laser. Furthermore, the method of determining the emissivity of Hastelloy C-276 is described. The results of a hot, static tensile strength test and of an investigation of the selection of an appropriate heating temperature of a nickel alloy during hot spinning are presented. The test results obtained were compared with the results of cold spinning of Hastelloy C-276.

Słowa kluczowe: wyoblanie, laser diodowy, stop Hastelloy C-276, emisyjność

Keywords: spinning, diode laser, Hastelloy C-276 alloy, emissivity

1. WSTĘP

Metodą kształtowania obrotowego wytwarza się głównie wyroby osiowo-symetryczne. Stosowanie tej metody jest ekonomicznie uzasadnione przy mało- i średnioseryjnej produkcji wyrobów. Proces ten realizuje się na specjalistycznych maszynach w tym ze sterowaniem numerycznym. Do metod obrotowego kształtowania zaliczamy zginiatanie obrotowe oraz wyoblanie [1].

Wyoblaniem nazywamy rodzaj obróbki plastycznej blach, która wykorzystuje podatność materiałów do odkształceń (po przekroczeniu granicy plastyczności), bez przerywania ciągłości kształtowanej blachy. Wyoblanie polega na kształtowaniu, wirującego krążka blachy, poprzez wywieranie miejscowego nacisku rolką wyoblającą. Ruch rolki odbywa się według ściśle określonej trajektorii, która zależna jest m.in. od takich czynników, jak: grubość i właściwości materiału, prędkość kształtowania, a przede wszystkim od kształtu wyrobu finalnego.

1. INTRODUCTION

Rotational shaping is mainly used to produce axially symmetrical products. The application of this method is economically justified for small and medium-lot production. This process is realized on specialized machines, including numerically controlled machines. Roll forming and spinning are classified as rotational forming methods [1].

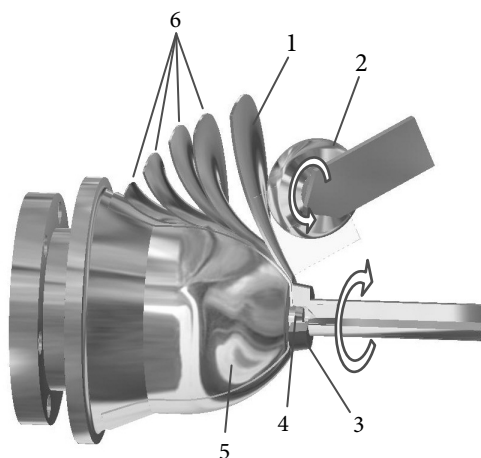
Spinning refers to a kind of sheet-metal forming process which uses a material's susceptibility to deformation (after passing the yield stress) without breaking the continuity of the sheet being shaped. Spinning consists of shaping a spinning disk of sheet metal by exerting local pressure with a spinning roller. The roller's motion follows a strictly defined trajectory, which depends on factors including: the thickness and properties of the material, the speed of shaping, and especially on the shape of the final product.

Schemat procesu wyoblania przedstawiono na rys. 1. Materiał wyjściowy w postaci krążka umieszczany jest na kołku centrującym, a następnie dociskany do czoła wzornika za pomocą dociskacza. Po uruchomieniu obrotów wrzeciona maszyny, wzornik wraz z materiałem oraz dociskaczem zostają wprowadzone w ruch obrotowy. Rolka wyoblająca, która porusza się wg zadanej trajektorii stopniowo kształtuje materiał na wzorniku, aż do momentu uzyskania finalnego wyrobu, zgodnego z kształtem wzornika. Trajektoria ruchu narzędzia wyoblającego musi przebiegać w taki sposób, aby nie dopuścić do zerwania oraz pofałdowania kształtowanego materiału.

Metodę wyoblania można podzielić na wyoblanie na zimno oraz wyoblanie na gorąco, czyli z podgrzewaniem materiału w trakcie trwania procesu kształtowania obrotowego. Technologię wyoblania na gorąco stosuje się do materiałów, których kształtowanie na zimno jest niemożliwe lub bardzo utrudnione.

A diagram of the process is shown in Fig. 1. The initial material, in the form of a disk, is placed on a centering pin, and then pressed to the mandrel with the help of a pressure pad. After initiating rotation of the machine's spindle, the mandrel with the material and the pressure pad begin to rotate. The spinning roller, which moves along an assigned trajectory, gradually shapes the material on the mandrel, until the final shape of the product, consistent with the shape of the mandrel, is achieved. The trajectory of the spinning tool's motion must be such as to not allow the rupture or creasing of the material being shaped.

Spinning can be divided into cold spinning and hot spinning, which is accompanied by heating of the material during the rotational shaping process. Hot-spinning technology is used for materials whose cold forming is impossible or greatly impeded.



Rys. 1. Schemat procesu wyoblania: 1 – materiał, 2 – rolka wyoblająca, 3 – dociskacz, 4 – pilot centrujący, 5 – wzornik, (6 – etapy kształtowania materiału)

Fig. 1. Scheme of the spinning process 1 – material, 2 – spinning roller, 3 – pressure pad, 4 – centering pilot, 5 – mandrel, (6 – phases of shaping of the material)

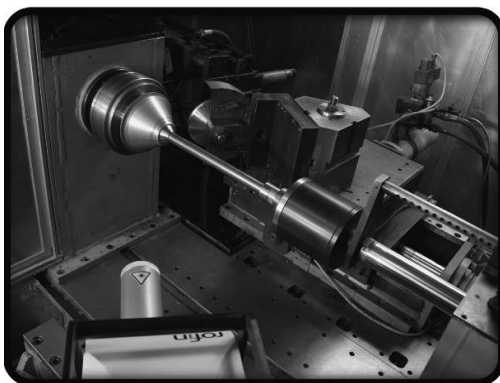
Najczęściej spotykaną (ze względów ekonomicznych) jest technologia kształtowania z podgrzewaniem palnikami gazowymi. Strumień ognia wydobywający się z palników skierowany jest na materiał, dzięki czemu jest on nagrzewany podczas procesu wyoblania. Taki sposób podgrzewania niekorzystnie wpływa na narzędzia, gdyż ogień z palników, oprócz podgrzewania kształtowanego materiału, dodatkowo podgrzewa narzędzia kształtujące, przyczyniając się

The most frequently encountered technology (in economic terms) is that of shaping with gas-burner heating. The stream of flame emitted from the burner is directed at the material, which is thus heated during the spinning process. Such a method of heating has a negatively affects the tools, as the flame from the burners, besides heating the formed material, also heats the forming tools, contributing to their fast wearing out. A newer and far more advantageous method is heating

do ich szybkiego zużycia. Nowszą i znacznie korzystniejszą metodą jest podgrzewanie za pomocą lasera diodowego dużej mocy. Pozwala to na skierowanie skupionej wiązki lasera na dowolny punkt wirującego krążka, co pozwala na zminimalizowanie niekorzystnego wpływu podgrzewania narzędzi. Ponieważ wirujący krążek bezpośrednio styka się z wzornikiem oraz z narzędziem kształtującym, wyeliminowanie problemu podgrzewania narzędzi jest niemożliwe. Dodatkową zaletą stosowania lasera diodowego jest pełna kontrola procesu podgrzewania, a tym samym możliwość płynnej regulacji temperatury nagrzewanego materiału podczas wyoblania [2].

2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Badania kształtowania z materiału Hastelloy C-276 przeprowadzono w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu na stanowisku badawczym wyposażonym w unikalną aparaturę badawczą, wraz ze sterowaną numerycznie wyoblarką MZH-500 posiadającą dwa niezależne suporty. Wyoblarka została doposażona w laser diodowy dużej mocy firmy Rofin (rys. 2 i 3). Ze względu na brak publikacji dotyczących kształtowania obrotowego materiału Hastelloy C-276, technologię opracowano na podstawie doświadczeń własnych [3–10].



Rys. 2. Wyoblarka MZH-500, doposażona w laser diodowy [15]
Fig. 2. MZH-500 spinner equipped with diode laser [15]

Materiałem wyjściowym do badań wyoblania z podgrzewaniem laserowym były krążki z blachy ze stopu Hastelloy C-276 o wymiarach: $\varnothing 200 \times 2$ i $\varnothing 200 \times 3$. Krążki przygotowano technologią cięcia strumieniem wody. Materiał w stanie

with the help of a high-power diode laser. This allows the focused laser beam to be aimed at any point on the spinning disk, which allows the negative effect of tool heating to be minimized. Because the spinning disk directly contacts the mandrel and the forming tool, elimination of the problem of tool heating is impossible. An additional advantage of using a diode laser is full control of the heating process and thus the possibility of fluid regulation of the heated material's temperature during spinning [2].

2. TESTED MATERIAL

The investigation of forming from Hastelloy C-276 was conducted at the Metal Forming Institute in Poznan at a research station equipped with unique research equipment, along with an MZH-500 numerically controlled spinner possessing two independent supports. The spinner was retrofitted with a high-power diode laser from the Rofin company (Fig. 2 and 3). Due to the lack of publications concerning the rotational forming of the material Hastelloy C-276, the technology was developed based on the researchers' own experience [3–10].



Rys. 3. Stanowisko sterowania laserem diodowym
Fig. 3. Diode laser control station

The initial material for tests of spinning with laser heating consisted of sheet metal disks from Hastelloy C-276, with the dimensions: $\varnothing 200 \times 2$ and $\varnothing 200 \times 3$. Disks prepared with the technology of water jet cutting. In its initial state, the material

wyjściowym charakteryzował się średnią twardością równą 560 HV. Dodatkowo stop ten charakteryzuje się dużą podatnością do umocnienia podczas kształtowania metodami obróbki plastycznej. Skład chemiczny stopu Hastelloy C-276 przedstawiono w tabeli 1.

was characterized by a moderate hardness of 560 HV. Additionally, this alloy is characterized by a high tendency towards strengthening during shaping with plastic forming methods. The chemical composition of Hastelloy C-276 is presented in Table 1.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu Hastelloy C-276 [11]

Tab. 1. Chemical composition of the Hastelloy C-276 alloy [11]

Ni	Mo	Cr	Fe	W	Mn	Co	C	S
56,8	16,1	16,2	5,95	3,35	0,44	0,16	0,003	0,002

Stop Hastelloy C-276 powszechnie stosowany jest w przemyśle celulozowo-papierniczym, na części wentylatorów używanych podczas spalania i odsiarczania gazów, a także na elementy chłodnic. Wyroby ze stopu Hastelloy C-276 stosowane są w przemyśle produkcji i przetwarzania kwasu fosforowego oraz przetwarzania odpadów komunalnych, a także w farmaceutyce i urządzeniach przemysłu spożywczego [12].

Ponadto ze stopów niklu wykonuje się wyroby rurowe stosowane przy eksploatacji tzw. źródeł zakwaszonych. Są to źródła ropy i gazu zawierające dużo siarkowodoru, chlorków i dwutlenku węgla [13–15].

3. METODYKA BADAWCZA

Celem badań było uzyskanie wyrobu finalnego w postaci stożka charakteryzującego się połową kąta rozwarcia równą 30°, z możliwością odchyłki do 0,5° oraz pocienienia ścianki wyrobu nie większą niż 25% w stosunku do grubości materiału wyjściowego.

Na stanowisku badawczym, na którym prowadzono badania wyoblania z podgrzewaniem laserowym zamontowano dwa pirometry firmy Raytek. Ustawienie pirometrów przedstawionych na rys. 4, pozwoliło na wyznaczenie temperatury nagrzanego materiału w miejscu kształtowanym przez rolkę.

Ruchy rolki wyoblającej oraz znajdująca się na drugim suporcie głowica lasera zostały tak zsynchronizowane, aby materiał był podgrzewany dokładnie na tej samej średnicy co kształtująca go rolka. Wykres wyoblania z podgrzewaniem laserowym zamieszczono na rys. 5 [16].

The Hastelloy C-276 alloy is widely used in the cellulose-paper industry for parts of the ventilators used during the burning and desulfurization of gases, and also for parts of coolers. Product from Hastelloy C-276 are used in the production and processing of phosphoric acids, the processing of municipal waste, pharmaceuticals, and grocery industry devices [12].

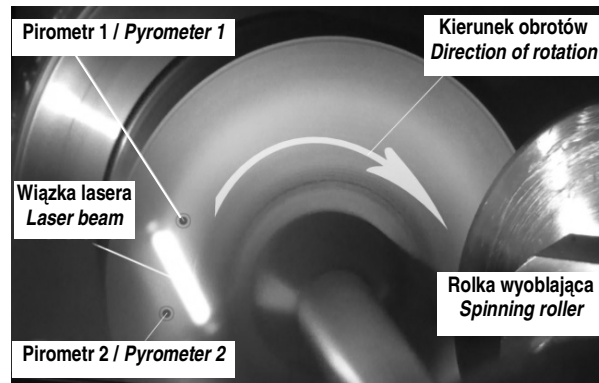
Furthermore, pipe products used in the exploitation of so-called acidified sources are made from nickel alloys. These are sources of oil and gas containing much hydrogen sulfide, chloride, and carbon dioxide [13–15].

3. TESTING METHODOLOGY

The goal of the research was to obtain a final product in the form of a cone exhibiting a cone half angle of 30° with a possible deviation of up to 0.5° and thinning of the product's wall not greater than 25% relative to the thickness of the initial material.

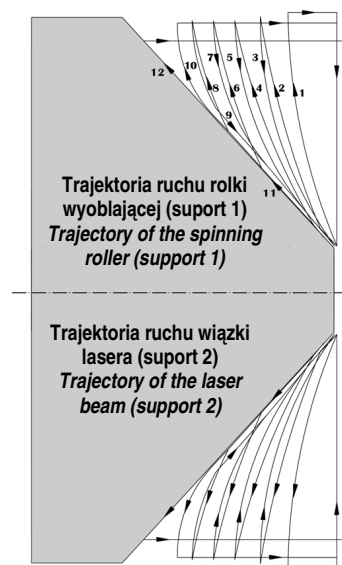
At the research station where the investigation of spinning with laser heating was conducted, two pyrometers from the Raytek company were installed. Positioning the pyrometers presented in Fig. 4 allowed for the determination of the temperature of the heated material in the place formed by the roller.

The movements of the spinning roller and the laser head located on the second support were synchronized so that the material was heated on exactly the same diameter as the roller forming it. A chart for spinning with laser heating is shown in Fig. 5 [16].



Rys. 4. Usytuowanie wiązki lasera oraz punktów pomiarowych pirometrów [17]

Fig. 4. Position of the laser beam and pyrometer measuring points [17]



Rys. 5. Przykładowy wykres trajektorii rolki wyoblającej oraz głowicy lasera

Fig. 5. Sample graph of the trajectory of the spinning roller and laser head trajectories

W celu określenia wpływu temperatury na umocnienie stopu podczas wyoblania z podgrzewaniem laserowym przeprowadzono statyczne próby rozciągania na zimno oraz na gorąco. Próby przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z250 w temperaturze 900°C oraz 1000°C. Przed przystąpieniem do badań wyoblania na gorąco wyznaczono, przy użyciu pieca laboratoryjnego oraz pirometru MR1S, współczynnik emisyjności dla stopu Hastelloy C-276.

Badania wyoblania z podgrzewaniem laserowym prowadzono przy zastosowaniu następujących parametrów technologicznych:

- obroty wrzeciona 410 [obr/min],
- posuw rolki wyoblającej 300 [mm/min] i 350 [mm/min],
- temperatura podgrzewania 900 [°C].

In order to determine the influence of temperature on the alloy's strengthening during spinning with laser heating, cold and hot static tensile tests were conducted. The tests were conducted on a Zwick/Roell Z250 strength testing machine at temperatures of 900°C and 1000°C. Before commencing the hot-spinning tests, the emissivity coefficient for Hastelloy C-276 was determined using a laboratory furnace and an MR1S pyrometer.

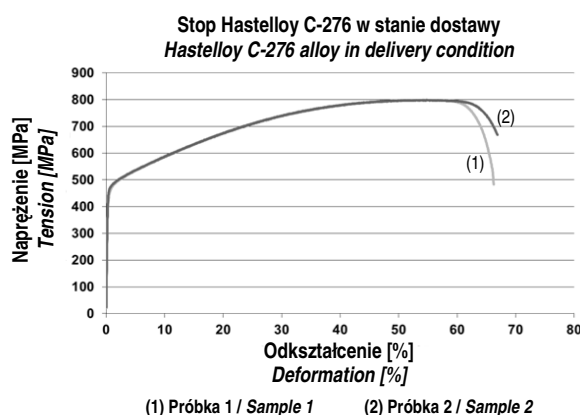
The test of spinning with laser heating was conducted using the following technological parameters:

- spindle rotation: 410 [rpm],
- spinning roller traverse rates of 300 [mm/min] and 350 [mm/min],
- heating temperature of 900 [°C].

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Statyczna próba rozciągania

W celu określenia właściwości materiału wyznaczono krzywą rozciągania materiału w stanie dostawy (rys. 6) oraz w stanie odkształconym po walcowaniu z redukcją grubości ścianki w zakresie 30–32% (rys. 7). Badania rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON.



Rys. 6. Krzywe rozciągania materiału w stanie dostawy [18]

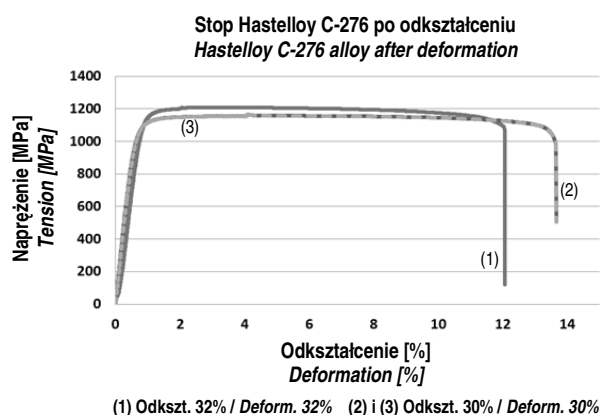
Fig. 6. Deformation curves for the material in delivery condition [18]

Wyznaczono granicę plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie dla materiału w stanie dostawy oraz po odkształceniu, a wyniki badań zamieszczono w tabeli 2.

4. TEST RESULTS

4.1. Static tensile test

In order to determine the properties of the material, strain curves were determined for the material in delivery condition (Fig. 6) and in the deformed state following rolling with a 30–32% reduction in wall thickness (Fig. 7). Tensile testing was conducted on an INSTRON endurance machine.



Rys. 7. Krzywe rozciągania materiału w stanie odkształconym (30–32%) [19]

Fig. 7. Deformation curves for the material in the deformed state (30–32%) [19]

The yield strength and the ultimate tensile strength were determined for the material in delivery condition and after deformation, and the results are presented in Table 2.

Tab. 2. Wyniki badań rozciągania dla stopu Hastelloy C-276

Tab. 2. Results of tensile testing for the Hastelloy C-276 alloy

Odkształcenie [%] Deformation [%]	$R_{e0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
0	440	798	65
30	1030	1154	14
32	1137	1207	12

Zaobserwowano po odkształceniu wyraźny wzrost granicy plastyczności materiału i wytrzymałości na rozciąganie oraz zmniejszenie właściwości wydłużenia z 65% do 12%. Tak duża zmiana świadczy o silnym umocnieniu się materiału podczas kształtowania [19].

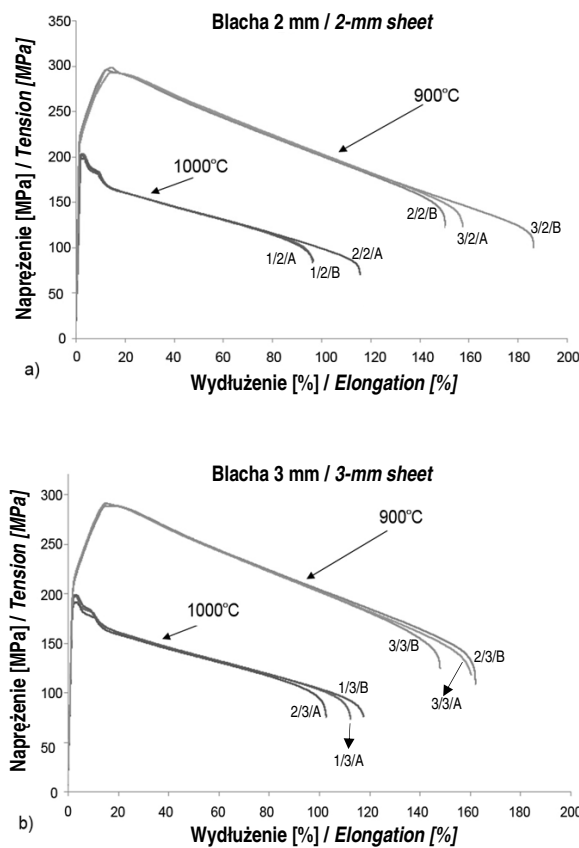
After the deformation, a clear increase in the material's yield strength and ultimate strength, and a decrease in the extension property from 65% to 12%, were observed. Such a large change testifies to the material's great strengthening during forming [19].

Przeprowadzono także badania statycznej próby rozciągania w temperaturze 900°C i 1000°C stopu Hastelloy C-276. Próba była przeprowadzona przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z250 z piecem firmy Maytec; wydłużenie próbki było mierzone przy pomocy ekstensometru wysokotemperaturowego.

Przed rozpoczęciem próby materiał był nagrzewany z piecem do żądanej temperatury, następnie wytrzymywany w tej temperaturze przez 15 minut, po czym prowadzono próbę rozciągania. Po rozciągnięciu próbki były chłodzone z piecem. Wyniki badań statycznej próby rozciągania na gorąco przedstawiono na rys. 8 [17].

Static tensile tests on Hastelloy C-276 were also conducted at temperatures of 900°C and 1000°C. The test was conducted using a Zwick/Roell Z250 strength testing machine with a Maytec company furnace; the sample's extension was measured with a high-temperature extensometer.

Before beginning the test, the material was heated to the desired temperature with the furnace, then kept at this temperature for 15 minutes, after which the tensile test was conducted. After stretching, the samples were cooled with the furnace. The results of the hot static tensile test are presented in Fig.8 [17].



Rys. 8. Wykres rozciągania blach o grubości 2 mm (a) oraz 3 mm (b) w temp. 900°C i 1000°C [17]
 Fig. 8. Graph of the stretching of metal sheets 2mm (a) and 3 mm (b) thick at temperatures of 900°C and 1000°C [17]

Podczas badań w temperaturze 900°C otrzymano mniejszą granicę plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie niż dla stopu w stanie dostawy. Na podstawie otrzymanych wyników oraz doświadczeń własnych [18, 20] określono temperaturę procesu wyoblania na gorąco.

During the tests, a lower yield strength and ultimate tensile strength were obtained at 900°C than for the alloy in delivery condition. The temperature of the hot spinning process was determined based on the results obtained and on prior experience [18, 20].

4.2. Wyznaczenie współczynnika emisyjności

Do poprawnego podgrzewania, konieczne jest odpowiednie ustawienie wiązki lasera, względem nagrzewanego materiału. W zależności od ustawienia kąta padania wiązki lasera na obrabiany przedmiot, uzyskuje się różną absorpcję dostarczanego ciepła. Najlepsze jest takie ustawienie głowicy lasera, aby podczas grzania obrabianego materiału, wiązka była prostopadła do materiału. Podczas doświadczeń przeprowadzonych podczas wstępnych badań stwierdzono, że nie ma możliwości takiego ustawienia. Wynika to z faktu, że kształtowany materiał ulega ciągłym zmianom położenia względem głowicy laserowej, więc kąt pomiędzy wiązką lasera, a powierzchnią obrabianego materiału stale się zmienia. Zatem przyjęto, że kąt wiązki lasera będzie kątem pośrednim, wynikającym z początkowego i końcowego kształtu podgrzewanego detalu [16].

Ponieważ podczas procesu wyoblania do kształtowanego materiału stale dostarczane jest ciepło do kontroli nagrzewanego materiału konieczny jest pomiar temperatury i określenie współczynnika emisyjności podgrzanego materiału. Współczynnik emisyjności stopu Hastelloy C-276 wyznaczono w piecu laboratoryjnym za pomocą termopary. Współczynnik emisyjności dobierano w taki sposób, aby odczyt z pirometru był zgodny z pomiarem termoparą. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 3 [19].

4.2. Determination of the emissivity coefficient

For proper heating, it is necessary to correctly position the laser beam relative to the heated material. Depending on the setting of the angle of incidence of the laser beam on the treated object, various absorption of supplied heat is achieved. The best position of the laser source is such that the beam is perpendicular to the material being formed during its heating. During the experiments conducted during initial tests, it was observed that such a position is not an option. This results from the fact that the material being formed is subjected to constant changes in position relative to the laser source, so the angle between the laser beam and the surface of the processed material is constantly changing. It was therefore accepted that the laser beam angle will be an indirect angle resulting from the initial and final shape of the heated item [16].

Because heat is constantly delivered to the formed material, control of the heated material requires measurement of the temperature and determination of the emissivity coefficient of the heated material. The emissivity coefficient of Hastelloy C-276 was determined in a laboratory furnace with the help of a thermocouple. The emissivity coefficient was selected so that the pyrometer reading was in accordance with a thermocouple measurement. The test results are provided in Table 3 [19].

Tab. 3. Emisyjność stopu Hastelloy C-276 [19]

Tab. 3. Emissivity of the Hastelloy C-276 alloy [19]

Lp. Item	Pomiar termoparą [°C] Thermocouple measurement [°C]	Pomiar pirometrem [°C] Pyrometer measurement [°C]	Emisyjność Emissivity
1	800	797	0,95
2		800	0,91
3		801	0,9
4	850	849	0,92
5		850	0,91
6		851	0,9
7	900	899	0,92
8		900	0,91
9		901	0,9
10	950	949	0,93
11		950	0,92
12		951	0,91

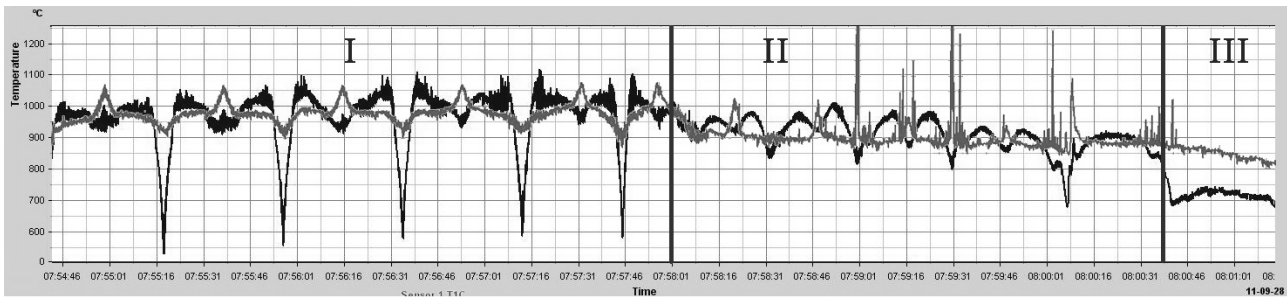
4.3. Badania wyoblania na gorąco

W celu uzyskania żądanej temperatury w czasie kształtowania metodą wyoblania na gorąco, konieczne było wcześniejsze wygrzanie materiału. W tym celu uruchomiono wrzeciono oraz support, na którym zamontowana była głowica lasera. Wiązka lasera stopniowo nagrzewała wirujący materiał, przesuając się kilkukrotnie, ruchem prostoliniowym, od średnicy mniejszej ku większej. Czas wygrzewania dla materiału o grubości 2 mm wynosił 270 sek., a w przypadku materiału o grubości 3 mm – 285 sek.

Na rys. 9 zamieszczono wykres zmiany temperatury uzyskany w trakcie procesu wyoblania z podgrzewaniem laserowym.

4.3. Investigation of hot spinning

In order to obtain the desired temperature during the forming process, prior heating of the material was necessary. With this goal, the spindle and the support on which the laser source was installed were activated. The laser beam gradually heated the spinning material, linearly traversing from the smaller diameter to the larger one several times. The time of heating for the 2-mm-thick material was 270 sec., while in the case of the 3-mm-thick material it was 285 sec. A graph obtained during the process of spinning with laser heating of the change in temperature is provided in Fig. 9.



Rys. 9. Zmiany temperatury podczas wyoblania na gorąco:
kolor czarny – pirometr 1, kolor szary – pirometr 2 (wg rys. 4)

Fig. 9. Changes in temperature during hot spinning:
black – pyrometer 1, grey – pyrometer 2 (according to Fig. 4)

Pierwsza część wykresu (I) przedstawia cykliczne nagrzewanie materiału. Ponieważ pirometr 1 (rys. 4) znajdował się tuż nad wiązką grzania promienia laserowego, jego temperatura jest nieco wyższa, niż w przypadku pirometru 2. Różnica temperatury wynikała wskutek obracającego się materiału, który pod wpływem obrotów został stopniowo wychłodzony. Cykliczne spadki temperatury świadczą o zmianie objętości nagrzewanego materiału.

W drugiej części wykresu (II) następowało kształtowanie materiału poprzez rolkę wyoblającą. Natomiast w trzeciej części wykresu (III), która odpowiada uzyskaniu ostatecznego kształtu wyrobu, można zaobserwować znaczne obniżenie temperatury, nagrzewanego materiału. Materiał kształtowany przylegał ściśle do wzornika, w skutek, czego następowało odprowadzenie ciepła z nagrzanego materiału poprzez wzornik, a tym samym wychłodzenie nagrzanego materiału [2].

The first part of the chart (I) presents the material's cyclical heating. Because pyrometer (Fig. 4) was located just above the laser beam, its temperature is slightly higher than in the case of pyrometer 2. The difference in temperatures resulted from the rotating material, which was gradually cooled under the influence of rotation. Cyclic drops in temperature indicate a change in the volume of the heated material.

In the second part of the chart (II), the material was formed by the spinning roller. However, in the third part of the chart (III), which corresponds to the achievement of the product's final shape, a significant decrease in the temperature of the heated material can be observed. The formed material adhered closely to the mandrel, as a result of which heat was transferred from the heated material through the mandrel, causing the heated material to cool [2].

Wyniki badań wyoblania z podgrzewaniem laserowym dla stopu Hastelloy C-276 zamieszczono w tabeli 4.

The results of the investigation of spinning with laser heating for Hastelloy C-276 are provided in Table 4.

Tab. 4. Wyniki badań wyoblania na gorąco, właściwości wyrobu

Tab. 4. Results of investigation of hot spinning, product properties

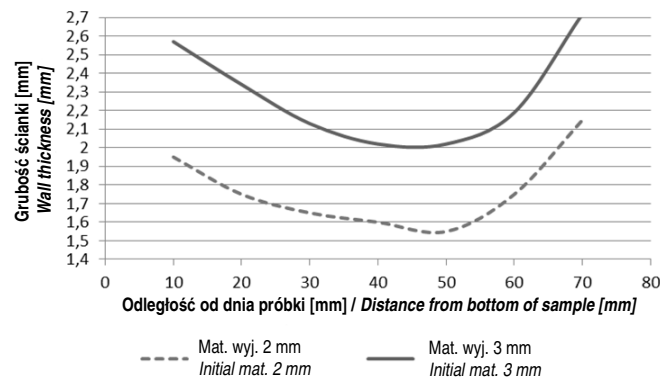
Nr No.	Obroty wrzeciona [obr./min] Spindle rotation [rpm]	Posuw [mm/min] Advance rate [mm/min]	Temperatura grzania [°C] Heating temperature [°C]	Średnia grubość ścianki [mm] Average wall thickness [mm]	Kąt [°] Angle [°]	Chropowatość R_a [μm] Roughness R_a [μm]	Twardość HV0,2 HV0,2 Hardness
Materiał wyjściowy 2 mm / Initial material 2 mm							
1-7	410	300	860-920	1,52-1,57	30,2-30,0	0,9-1,4	390
8-14		350	850-900	1,75-1,77	30,3-30,1	1,1-1,7	420
Materiał wyjściowy 3 mm / Initial material 3 mm							
1-7	410	300	880-910	2,22-2,28	30,3-30,0	1,2-1,7	380
8-14		350	840-890	2,29-2,34	30,5-30,3	1,5-2,0	390

Pomiar chropowatości przeprowadzono na odcinku o długości 15 mm z prędkością pomiarową równą 1 mm/s. Średnia wartość chropowatości dla wyrobu o grubości 2 mm, kształtowanego przy posuwie 300 mm/min wynosiła $R_a = 1,15 \mu\text{m}$ natomiast dla posuwu 350 mm/min wynosiła $R_a = 1,4 \mu\text{m}$. Średnia chropowatość materiału o grubości 3 mm wynosiła odpowiednio $R_a = 1,45 \mu\text{m}$ oraz $R_a = 1,75 \mu\text{m}$.

Wyniki rozkładu grubości ścianki materiału wyjściowego o grubości 2 mm oraz 3 mm przedstawiono na rys. 10. Zarówno w przypadku materiału wyjściowego o grubości 2 mm, jak i 3 mm następuje znaczne pocienienie ścianki w połowie długości tworzącej stożka. Wzrost grubości ścianki w końcowej fazie kształtowania wyrobu, spowodowany był dużym przeformowaniem materiału.

The measurements of roughness were conducted on a segment 15 mm long with a measuring speed equal to 1 mm/s. The mean value of the roughness for the product 2 mm thick, formed with a traverse rate of 300 mm/min, was $R_a = 1.15 \mu\text{m}$, while for a traverse rate of 350 mm/min it was $R_a = 1.4 \mu\text{m}$. The corresponding mean thicknesses of the material with a thickness of 3 mm were $R_a = 1.45 \mu\text{m}$ and $R_a = 1.75 \mu\text{m}$.

The results of the distribution of wall thickness of the initial material with thicknesses of 2 mm and 3 mm are presented in Fig. 10. Both in the case of the 2-mm- and the 3-mm-thick initial material, there occurs a substantial thinning of the wall in the middle of the length forming the cone. The increase in wall thickness in the final phase of the product's shaping was caused by the material's substantial reformation.



Rys. 10. Rozkład grubości ścianki materiału o grubości 2 i 3 mm

Fig. 10. Distribution of wall thickness of the 2- and 3-mm thick material

Metodę wyoblania stopu Hastelloy C-276 na gorąco z użyciem lasera diodowego, porównano z metodą wyoblania na zimno. Należy nadmienić, że podczas kształtowania stopu Hastelloy C-276 metodą wyoblania na zimno konieczne było zastosowanie międzyoperacyjnej obróbki cieplnej. W tabeli 5 zestawiono wyniki badań pomiaru chropowatości dla wyrobów uzyskanych metodą wyoblania z podgrzewaniem laserowym (na gorąco) oraz wyoblania na zimno.

The method of hot spinning of the Hastelloy C-276 alloy with diode laser heating was compared with that of cold spinning. It should be noted that during the forming of Hastelloy C-276 with cold spinning, it was necessary to use inter-operational heat treatment. Table 5 shows the test results of the roughness measurement for products obtained with (hot) spinning with laser heating and cold spinning.

Tab. 5. Wyniki badań dla stopu Hastelloy C-276 uzyskane po wyoblaniu na zimno oraz na gorąco

Tab. 5. Test results for Hastelloy C-276, obtained after cold and hot spinning

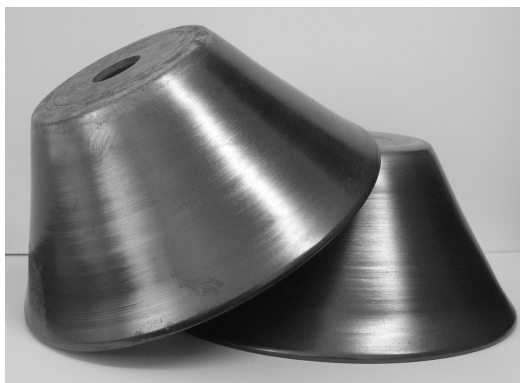
Posuw [mm/min] Traverse rate [mm/min]	Rodzaj wyoblania / Type of spinning					
	na zimno cold	na gorąco hot	na zimno cold	na gorąco hot	na zimno cold	na gorąco hot
	Grubość ścianki [mm] Wall thickness [mm]		Chropowatość R_a [μm] Roughness R_a [μm]		Kąt wytłoczeki [$^\circ$] Extrusion angle [$^\circ$]	
Materiał wyjściowy 2 mm / Initial material 2 mm						
300	1,66	1,56	1,63	1,15	30,6	30,1
350	1,68	1,76	2,27	1,4	30,7	30,2
Materiał wyjściowy 3 mm / Initial material 3 mm						
300	2,4	2,25	2,1	1,45	30,7	30,2
350	2,48	2,31	2,21	1,75	30,8	30,4

Wyrób finalny z materiału wyjściowego o grubości 2 mm, oraz 3 mm uzyskany metodą wyoblania na gorąco charakteryzował się mniejszym kątem odsprężynowania oraz lepszą jakością na powierzchni wyrobu w porównaniu do wyrobu uzyskanego podczas wyoblania na zimno.

Zastosowanie podgrzewania laserowego w procesie wyoblania pozwoliło na wyeliminowanie zjawiska sprężynowania powrotnego materiału, które w przypadku kształtowania na zimno udało się zminimalizować poprzez zastosowanie obróbki cieplnej, a następnie ponowne kształtowanie wyrobu. Mimo to podczas wyoblania na zimno wartość odsprężynowania materiału była większa niż w przypadku wyoblania na gorąco: dla materiału o grubości 2 mm wynosiła min. $0,6^\circ$, natomiast dla materiału o grubości 3 mm wynosiła min. $0,7^\circ$. Końcowy kształt wyrobu przedstawiono na rys. 11.

The final product made from the initial material with thicknesses of 2 mm and 3 mm, obtained through hot spinning, was characterized by a smaller spring-back angle and better quality on the product's surface, compared to the product obtained during cold spinning.

The application of laser heating during the spinning process made it possible to eliminate the phenomenon of material spring-back, which, in the case of cold forming, was possible to minimize by applying heat treatment followed by more forming of the product. Despite this, during cold spinning, the spring-back value of the material was greater than in the case of hot spinning; for the material 2 mm thick it was at least 0.6° , while for the 3-mm-thick material it was at least 0.7° . The final shape of the product is presented in Fig. 11.



Rys. 11. Wyrób końcowy uzyskany metodą wyoblania z podgrzewaniem laserowym [15]

Fig. 11. Final product obtained through the method of spinning with laser heating [15]

5. WNIOSKI

1. Zastosowanie dwóch pirometrów podczas wyoblania z podgrzewaniem laserowym, umożliwiło precyzyjny pomiar temperatury kształtowanego materiału.
2. Zastosowanie podgrzewania w trakcie procesu wyoblania, pozwoliło na wyeliminowanie międzyoperacyjnej obróbki cieplnej, która w procesie wyoblania na zimno była niezbędna do uzyskania wyrobu końcowego.
3. Stosując podgrzewanie laserowe podczas procesu wyoblania, uzyskano wyrób dokładny, zgodny z założeniami.

PODZIĘKOWANIA

Badania materiału Hastelloy C-276 zamieszczone w artykule realizowano w ramach 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”.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Gądek T.: *Ocena odkształcenia materiału w procesie zgniatania obrotowego wyrobów cylindrycznych ze stopu aluminium*. Praca magisterska, Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Poznań 2006, s. 9–10.
- [2] Gądek T., Nowacki Ł.: *Research of rotary forming Hastelloy C-276 material with employment of laser beam heating*. *AutoMetForm*, Wrocław 2012, s. 327–337.
- [3] Wiśniewski J.: *Technologia wytwarzania złożonych kształtów wytłoczek na nowoczesnych obrotowych maszynach*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Tendencje rozwojowe w technologii maszyn”. WSI Zielona Góra 1992, s. 43.

5. CONCLUSIONS

1. *The use of two pyrometers during spinning with laser heating enabled precise measurement of the temperature of the material being formed.*
2. *The application of heating during the spinning process made it possible to eliminate inter-operational heat treatment, which was necessary to obtain the final product during the cold spinning process.*
3. *Using laser heating during the spinning process, a precise product, consistent with the objectives, was obtained.*

ACKNOWLEDGEMENTS

The tests of the Hastelloy C-276 alloy used in this article were conducted as part of the author's research project, No. N N507 593838, titled: "Technology of plastic forming of complex products made from the Hastelloy C-276 nickel and molybdenum alloy for the aircraft, chemical, and communal industries".

- [4] Wiśniewski J., Perkowski A., Drenger T.: *CNC w maszynach do kształtowania obrotowego produkcji INOP. Obróbka Plastyczna Metali* nr 3 (1992), s. 23–26.
- [5] Cielecki T., Drenger T., Wiśniewski J.: *Rozwój technologii wyoblania i zgniatania obrotowego oraz urządzeń i maszyn projektowanych i wykonanych w Instytucie Obróbki Plastycznej. Obróbka Plastyczna Metali* nr 3 (1998), s. 69–74.
- [6] Drenger T., Wiśniewski J.: *Badania zgniatania obrotowego stożków blaszanych ze stali kwasoodpornej. Obróbka Plastyczna Metali* nr 3 (1999), s. 11–15.
- [7] Drenger T., Nowacki Ł., Wiśniewski J., Ulatowski Z.: *Badania technologii kształtowania obrotowego wyrobów z blach w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Obróbka Plastyczna Metali* nr 1 (2005), s. 53–58.
- [8] Drenger T., Nowacki Ł., Wiśniewski J., Ulatowski Z.: *Łączenie technologii wyoblania ze zgniataniem obrotowym. Obróbka Plastyczna Metali* nr 1 (2006), s. 3–5.
- [9] Szummer A., Lublińska K.: *Wpływ odkształcenia plastycznego na dyfuzję wodoru w odpornych na korozję stopach niklu. Inżynieria Materiałowa* nr 1 (2006), s. 23–28.
- [10] Gądek T.: *Badanie możliwości kształtowania stopu Hastelloy C-276 metodą tłoczenia oraz zgniatania obrotowego. Obróbka Plastyczna Metali* t. XXII nr 1 (2011), s. 31–44.
- [11] Certyfikat materiału Hastelloy C-276 Jacquet Spec. SM/01/PV Rev 10/31.01.2006.
- [12] Szummer A., Lublińska K.: *Wpływ odkształcenia plastycznego na dyfuzję wodoru w odpornych na korozję stopach niklu. Inżynieria Materiałowa* nr 1 (2006), s. 23–28.
- [13] Dobrzański L.A.: *Metaloznawstwo opisowe stopów metali nieżelaznych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, s. 144–157.
- [14] Dobrzański L.A.: *Metalowe materiały inżynierskie*. WNT, Warszawa 2004, s. 501–504.
- [15] Drenger T., Frąckowiak S., Gądek T., Nowacki Ł., Pawlicki M.: *Kształtowanie obrotowe wyrobów z materiałów trudno odkształcalnych. Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* październik 2011, s. 15–16.
- [16] Drenger T., Gądek T., Nowacki Ł., Wiśniewski J.: *Innowacyjna technologia kształtowania obrotowego wytłoczek ze stopu niklu z miejscowym podgrzewaniem laserowym. Obróbka Plastyczna Metali* t. XXI nr 2 (2010), s. 95.
- [17] Sprawozdanie merytoryczne 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”, s. 49–50.
- [18] Pakieła Z.: *Badanie wpływu stopnia odkształcenia na strukturę i właściwości mechaniczne stopu niklu Hastelloy C276. Raport z badań (niepublikowany)*, s. 4.
- [19] Gądek T.: *Badanie możliwości kształtowania blach ze stopu Hastelloy C276 metodą zgniatania obrotowego. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2014*, s. 48.
- [20] Gądek T., Nowacki Ł.: *Investigation of an innovative technology of heating hard-to-deform materials in the processes of sheet metal rotary forming*. 18th International Scientific and Technical Conference „Design and Technology of Drawpieces and Die Stampings”. Poznań–Wąsowo, June 2010, s. 57–78.

