

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

Rozpoznawcze badania możliwości kształtowania metodami obróbki plastycznej elementów ze stopu niklu Inconel 625

Investigation of the possibility of forming Inconel 625 nickel alloy parts by methods of metal forming

Streszczenie

W artykule przedstawiono wstępne badania procesów obróbki plastycznej przeprowadzone na stopie niklu (Inconel 625) bez obróbki cieplnej. Materiał wyjściowy w postaci krążka wycięty z blachy o grubości 2 i 3 mm, poddano próbom wytłaczania bez dociskacza oraz z dociskaczem.

Badawczy proces tłoczenia przeprowadzono na prasach hydraulicznych o nacisku 630 kN i 2500 kN. Uzyskane w procesie wytłaczania cylindryczne wytłoczki poddane zostały próbom zgniatania obrotowego wydłużającego, polegającym na pocienieniu i wydłużeniu ścianki poboczniczy półwyrobów. Proces zgniatania wydłużającego przeprowadzono na maszynie MZH-400 konstrukcji Instytutu. W publikacji zamieszczono niektóre wyniki badań oraz wnioski podsumowujące badania.

Abstract

The paper presents initial investigation of the processes of metal forming as performed on a nickel alloy (Inconel 625) without heat treatment. A blank in the form of a disc cut of 2 and 3 mm thick sheet has been subjected to trials of drawing with a blank holder and without one.

The experimental drawing process has been performed on hydraulic presses with the capacity of 630kN and 2500 kN. The cylindrical drawpieces obtained in the process have undergone trials of elongating flow forming consisting in thinning and elongating the side wall of the blanks. The process of flow forming has been performed on the MZH-400 machine designed by the Institute. The paper includes some investigation results and conclusions.

Słowa kluczowe: wytłaczanie, tłoczenie, zgniatanie obrotowe, stop niklu, współczynnik wytłaczania

Key words: drawing, press forming, flow forming, nickel alloy, drawing coefficient

1. WPROWADZENIE

W Instytucie Obróbki Plastycznej prowadzone są badania doskonalące metody kształtowania obrotowego w połączeniu z tłoczeniem.

Zakład Tłoczenia Instytutu prowadzi również badania rozpoznawcze możliwości kształtowania nowoczesnych materiałów, które ze względu na swoje walory eksploatacyjne mają dużą przyszłość.

Jednym z takich materiałów jest super stop niklu (Inconel 625), którego możliwościami kształtowania metodami obróbki plastycznej są zainteresowane zakłady przemysłu silników lotniczych w kraju, a także producenci zagraniczni.

2. MATERIAŁ I STANOWISKA BADAŃ

Materiałem wyjściowym były krążki wycięte z blachy o średnicy $\phi 145$ i $\phi 200$ mm,

o grubości 2,3 mm i 3,1 mm wykonane ze stopu niklu.

Stop niklu znany pod nazwą Inconel 625, charakteryzuje się dużą podatnością do umocnienia podczas kształtowania metodami obróbki plastycznej.

Według lotniczej normy materiałowej SAE AMS 5599F, cienkie blachy z tego stopu powinny charakteryzować się minimalną granicą plastyczności 415 MPa i wytrzymałością na rozciąganie 850 MPa oraz wydłużeniem do zerwania min. 30% [1].

Skład chemiczny stopu Inconel 625 przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Skład chemiczny stopu niklu – Inconel 625
Table 1. Chemical composition of Inconel 625 nickel alloy

Pierwiastek	Min.	Max
1	2	3
Węgiel	-	0,10
Mangan	-	0,50
Krzem	-	0,50
Fosfor	-	0,015
Siarka	-	0,015
Chrom	20,00	23,00
Żelazo	-	5,00
Molibden	8,0	10,0
Niob	3,15	4,15
Tytan	-	0,40
Aluminium	-	0,40
Kobalt	-	1,00
Tantal	-	0,05
Nikiel	reszta	

Twardość krążków w stanie wyjściowym wynosiła średnio 21 HRC. Równocześnie do badań przygotowano krążki o średnicy $\phi 145$ i $\phi 200$ mm oraz grubości 2 mm, wykonane z blachy tłocznej.

Badanie przeprowadzono na następujących maszynach i oprzyrządowaniu:

- prasa hydromechaniczna typ PHP ZD-63 z regulowanym dociskaczem (rys. 1) zbudowana na bazie zmodernizowanej prasy hydraulicznej 630 kN. W badaniach wytłaczano na niej cylindryczne miseczki z krążków o grubości 2 mm, ze stali tłocznej i krążków o grubości 2,3 mm z Inconelu 625;



Rys. 1. Tłocznik doświadczalny zamontowany na prasie hydromechanicznej typu PHP ZD-63

Fig. 1. Experimental stamping die mounted on a hydromechanical press type PHP ZD-63

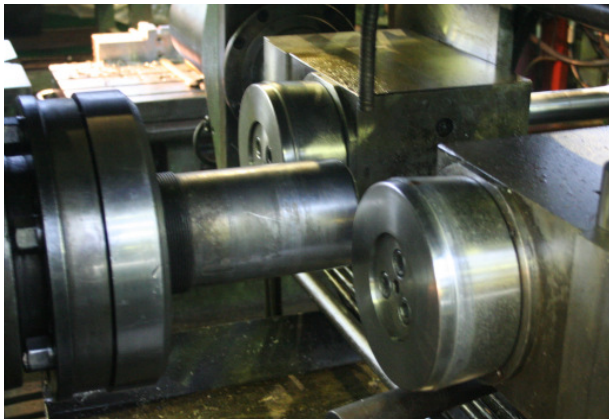
- prasa hydrauliczna typ PYE-250 o nacisku 2500 kN (rys. 2). W badaniach wytłaczano cylindryczne miseczki z krążków o grubości 3 mm, ze stali tłocznej i nierdzewnej oraz krążki o grubości 3,1 mm z Inconelu 625;



Rys. 2. Tłocznik doświadczalny zamontowany na prasie hydraulicznej typ PYE-250

Fig. 2. Experimental stamping die mounted on a hydraulic press type PYE-250

- zgniatarka obrotowa MZH-400 (rys. 3) sterowana za pomocą kopiału hydraulicznego. W badaniach zgniatano obrotowo wydłużając wytłoczone miseczki ze stali tłocznej i z Inconel 625;



Rys. 3. Zgniatarka obrotowa MZH-400

Fig. 3. Flow forming machine MZH-400

- tłoczniki do wytłaczania z krążków wytłoczek cylindrycznych wraz ze stemplem i dwoma matrycami (rys. 1 i 2);
- wzornik do zgniatania obrotowego oraz dwie rolki kształtujące (rys. 3);
- twardościomierz typ FR-3ATL produkcji Future-Tech Corp.;
- aparat do pomiaru chropowatości firmy Taylor/Hobson.

3. METODYKA BADAŃ

Badania prowadzono celem sprawdzenia możliwości odkształcania plastycznego nowego stopu niklu Inconel 625 w procesie wytłaczania oraz porównanie z procesem kształtowania wytłoczek ze stali tłocznej i częściowo ze stali nierdzewnej oraz celem opracowania optymalnego procesu zgniatania obrotowego.

3.1. Proces wytłaczania miseczki

Określono wielkość współczynnika wytłaczania [2] dla dwóch stosowanych średnic krążków wyjściowych wg wzoru:

$$m = \frac{d}{D}$$

gdzie:

d – średnica średnica wytłoczki $d = 123$ mm,

D – średnica krążka:

$$D_1 = 145 \text{ mm}, D_2 = 200 \text{ mm}.$$

Współczynniki wytłaczania wynosiły: dla $\phi 145$ $m_1 = 0,848$ i dla $\phi 200$ $m_2 = 0,615$.

Proces wytłaczania z krążków o średnicy $\phi 145$ mm wykrawanych z blachy tłocznej i super stopu niklu oraz krążków o średnicy $\phi 200$ mm wykrawanych z blachy tłocznej, nierdzewnej i super stopu niklu przeprowadzono w jednej operacji.

Dobór geometrii oraz wymiarów roboczej części matryc do wytłaczania wyznaczono przyjmując grubości krążków ze stopu niklu Inconel 625 jako podstawowe.

Zgodnie z warunkiem utraty stateczności, stwierdzono konieczność stosowania dociskacza przy wytłaczaniu miseczek z krążka o grubości 3 mm [2]:

$$\frac{g}{D} \cdot 100 \leq 4,5(1 - m)$$

Sprawdzono dwa warunki brzegowe.

Warunek 1:

$$\begin{aligned} g_1 &= 2 \text{ mm} \\ D_1 &= 145 \text{ mm} \\ m_1 &= 0,848 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{g_1}{D_1} \cdot 100 &\leq 4,5(1 - m_1) \\ 1,38 &\leq 0,684 \end{aligned}$$

Ponieważ warunek utraty stateczności nie został spełniony, zastosowanie dociskacza nie było konieczne w przypadku blachy grubości 2 mm.

Warunek 2:

$$\begin{aligned} g_2 &= 3 \text{ mm} \\ D_2 &= 200 \text{ mm} \\ m_2 &= 0,615 \end{aligned}$$

$$\frac{g_2}{D_2} \cdot 100 \leq 4,5(1 - m_2)$$

$$1,5 \leq 1,73$$

W tym przypadku warunek utraty stateczności został spełniony stąd stosowanie dociskacza było konieczne.

W celu doboru odpowiedniej prasy obliczono siłę potrzebna do wytłaczania miseczki cylindrycznej wg wzoru [2]

$$P = \pi \cdot d \cdot g \cdot R_m \cdot k$$

gdzie:

d – średnia średnica wytłoczki, d = 122,5 mm

g – grubość krążka, g₁ = 2 mm, g₂ = 3 mm

R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_m = 830 MPa

k – współczynnik, k = 0,8

$$\text{dla } g_1 = 2 \text{ mm: } P_1 = \pi \cdot d \cdot g_1 \cdot R_m \cdot k$$

$$P_1 = 508988 \text{ N} \cong 510 \text{ kN}$$

$$\text{dla } g_2 = 3 \text{ mm: } P_2 = \pi \cdot d \cdot g_2 \cdot R_m \cdot k$$

$$P_2 = 769740 \text{ N} \cong 770 \text{ kN}$$

Dodatkowo uwzględniono siłę – P_d potrzebną na dociskaczu

$$P_d = F \cdot q$$

gdzie:

F – pole półfabrykatu pod dociskaczem (mm²),

q – średni nacisk jednostkowy dociskacza,

$$q = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$F = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) = 19630 \text{ mm}^2$$

$$P_d = 45075 \text{ N} = 50 \text{ kN}$$

Całkowita siła potrzebna do wytłaczania (minimalna siła nacisku prasy) wynosiła dla krążka o grubości 3 mm:

$$P_{C1} = 770 + 50 = 820 \text{ kN}$$

Całkowita siła wytłaczania z krążka o grubości 2 mm wynosiła:

$$P_{C2} = 510 + 50 = 560 \text{ kN}$$

Stąd dla tłoczenia wytłoczek z krążków o grubości 3 mm zastosowano prasę hydrauliczną o nacisku 2500 kN, a dla krążków o grubości 2 mm, zastosowano prasę hydromechaniczną o nacisku 630 kN.

3.2. Proces zgniatania obrotowego wydłużającego

Po wytłoczeniu miseczek cylindrycznych poddano je procesowi zgniatania obrotowego wydłużającego (wydłużenie pobocznic miseczki cylindrycznej kosztem pocienienia jej ścianki) bez międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.

3.3. Parametry technologiczne badań procesu wytłaczania i zgniatania obrotowego wydłużającego

Czynnikami stałymi (wyjściowymi) w procesie wytłaczania i zgniatania obrotowego wydłużającego były:

- narzędzia (wzornik i rolki o stałej geometrii części kształtującej),
- materiał: blacha o grubości 2 i 3 mm ze stopu Inconel 625 i blacha o grubości 2 i 3 mm stal tłoczna oraz nierdzewna o grubości 3 mm,
- parametry kinematyczne procesu zgniatania obrotowego prędkość obrotowa wzornika V = 500 obr/min., prędkość przesuwu rolek p = 400 mm/min,
- intensywność chłodzenia emulsją wodną 0,5 l/s przy zgniataniu obrotowym.

Natomiast czynnikami badanymi procesu wytłaczania i zgniatania obrotowego były:

- odkształcenie względne $\varepsilon = \frac{g_o - g_1}{g_o} \cdot 100\%$,
- twardość HRC po operacji obróbki plastycznej,
- chropowatość powierzchni, Ra (μm),
- odsprężynowanie materiału.

4. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Badania procesu wytłaczania z krążków o grubości 2 mm przeprowadzono na prasie hydraulicznej o nacisku 630 kN. Z krążków o średnicy $\phi 145$ mm wytłaczano miseczki bez stosowania dociskacza, a z krążków o średnicy $\phi 200$ mm stosowano dociskacz [6].

Pozytywne wyniki uzyskano przy wytłaczaniu krążków ze stali tłocznej z krążków o średnicy $\phi 145$ i $\phi 200$ mm ($m \cong 0,85$ i $m \cong 0,61$).

Przy wytłaczaniu z krążków ze stopu niklu Inconel 625 uzyskano pozytywny wynik w procesie wytłaczania ze współczynnikiem $m \cong 0,85$. Uzyskaną wytłoczkę ze stopu Inconel 625 pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Wytłoczka ze stopu niklu Inconel 652 wytłaczana ze współczynnikiem $m \cong 0,85$

Fig. 4. A drawpiece of Inconel 625 alloy drawn with the coefficient of 0.85

Podczas wytłaczania z krążków o średnicy $\phi 200$ mm ($m \cong 0,61$) udało się uzyskać tylko niewielkie zagłębienia stempla (rys. 5).

Teoretycznie wyliczona siła potrzebna do wytłaczania miseczek ze stali tłocznej okazała się niewystarczająca dla kształtowania wytłoczek ze stopu niklu.

W trakcie wytłaczania tego stopu nastąpiło gwałtowne umocnienie materiału wywołując znaczny wzrost siły przekraczając możliwości prasy hydraulicznej o nacisku 630 kN.



Rys. 5. Wytłoczka ze stopu niklu Inconel 625 wytłaczana ze współczynnikiem $m \cong 0,61$

Fig. 5. A drawpiece of Inconel 625 alloy drawn with the coefficient of 0.61

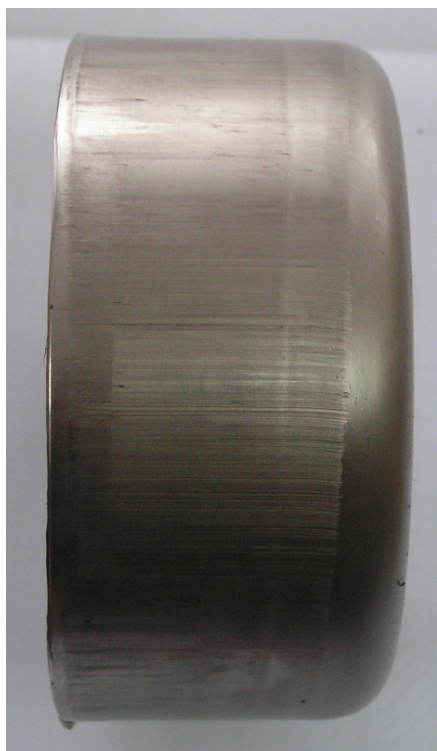
Próby technologiczne wytłaczania miseczek z krążków o grubości 3 mm i średnicy $\phi 145$ mm ($m \cong 0,85$) przeprowadzono na prasie hydraulicznej o nacisku 2500 kN bez dociskacza. Pozytywne wyniki uzyskano przy wytłaczaniu z krążków o średnicy $\phi 200$ mm ($m \cong 0,61$) ze stali tłocznej i stali nierdzewnej stosując siłę na dociskaczu w granicach 60 kN. Początkowo nie udało się wytłoczyć miseczki ze stopu niklu, pomimo zastosowania podobnych sił na dociskaczu, jak dla wyżej wymienionych materiałów stalowych.

W połowie procesu wytłaczania miseczki materiał zaczął tracić stateczność w efekcie czego na poboczniczy wytłoczki powstały fałdy, które w trakcie dalszego ciągnięcia spowodowały uszkodzenie matrycy.

Po wykonaniu nowej matrycy o wzmocnionej konstrukcji wznowiono próby wytłaczania miseczek ze stopu niklu, zwiększając dwukrotnie wielkość siły na dociskaczu.

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano poprawne wytłoczki ze stopu niklu Inconel 625 przy współczynniku wytłaczania $m \cong 0,61$ (rys. 6) i przy całkowitej sile wytłaczania równej ok. 2000 kN. Siła wytłaczania miseczek ze stali tłocznej wynosiła 900-

1000 kN, natomiast miseczek ze stali nierdzewnej gatunku 0H18N9 około 1200 kN.



Rys. 6. Miseczka ze stopu niklu Inconel 625 uzyskana w procesie wytłaczania ze współczynnikiem $m \cong 0.61$

Fig. 6. An Inconel 625 alloy cup obtained in a process of drawing with coefficient of 0.61

Wyniki badań procesu wytłaczania miseczek ze stopu niklu Inconel 625 ze współczynnikiem wytłaczania $m \cong 0,85$ zamieszczono w tablicy 2 [6].

Badania procesu zgniatania obrotowego wydłużającego przeprowadzono na wytłoczonych cylindrycznych miseczkach o grubości ścianki 2 mm, ze stopu niklu bezpośrednio po wytłaczaniu bez operacji wyżarzania (przesykania).

Proces badawczy obrotowego wydłużania przeprowadzono na zgniatarce obrotowej MZH-400 stopniowo zwiększając warstwę przemieszczanego materiału.

Na podstawie dokonanych pomiarów na pocienionych i wydłużonych ściankach pobocznic wytłoczek określono twardość i wielkość odsprężynowania (kąt pochylenia poboczny) odkształcenie względne oraz wydłużenie względne i chropowatość powierzchni.

Wyniki badań procesu zgniatania obrotowego zamieszczono w tablicy 3 [6].

Tablica 2. Wyniki badań procesu wytłaczania miseczek ze stopu niklu Inconel 625

Table 2. The results of the investigation of cup drawing of Inconel 625 nickel alloy

Nr Próbki	Średnica krążka wyjściowego ϕD_1 (mm)	Grubość krążka wyjściowego g (mm)	Wysokość wytłoczki (mm)	Średnia twardość pobocznicy HRC	Kąt pochylenia pobocznicy odsprężyn. (stopnie)
1	2	3	4	5	6
5	145	2	17,4	31,00	5°
2	145	2	17,1	30,8	4°
7	145	2	17,3	31	4,5°
19	145	2	17,6	31,1	5°
20	145	2	17,2	30,9	4°
1	145	2	17,1	30,9	4,5°

Tablica 3. Wyniki badań procesu zginiatania obrotowego stopu niklu Inconel 625
 Table 3. The results of investigation of flow forming of Inconel 625 nickel alloy

Nr próbki	Średnica krążka wyjściowego ϕD_1 (mm)	Grubość krążka wyjściowego g (mm)	Wysokość wytłoczki (mm)	Średnia twardość poboczniczy HRC	Kąt pochylenia poboczniczy odsprężynowania ($^\circ$)	Odkształcenie względne ε (%)	Odkształcenie wydłużające względne ε	Chropowatość Ra (μm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	145	2	19,17	36,65	5 $^\circ$	13,9	0,10	1,57
2	145	2	20,45	38,06	6 $^\circ$	19,6	0,19	1,55
7	145	2	20,70	39,63	5 $^\circ$	21,7	0,20	1,53
19	145	2	20,12	38,18	6 $^\circ$	20,7	0,16	1,54
20	145	2	22,27	39,73	7 $^\circ$	26,0	0,29	1,60

Z analizy uzyskanych wyników można wnioskować:

- twardość badanych próbek wzrasta wraz ze wzrostem wielkości stosowanych odkształceń,
- wielkość odsprężynowania cylindrycznych powierzchni kształtowanych w procesie wytłaczania i zginiatania obrotowego jest zależna od wielkości stosowanego odkształcenia.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie wstępnych badań kształtowania nowego stopu niklu Inconel 625, można stwierdzić, że Inconel 626 jest materiałem trudnoodkształcalnym w procesach kształtowania metodami obróbki plastycznej. Na skutek odkształcenia plastycznego wyroby ze stopu niklu Inconel 625 ulegają bardzo szybkiemu umocnieniu. Powoduje to gwałtowny wzrost siły wytłaczania. Niedogodnością przy kształtowaniu wyrobów z tego stopu metodami obróbki plastycznej jest jego skłonność do znacznego odsprężynowania po uwolnieniu sił zewnętrznych.

Siły występujące przy tłoczeniu stopu niklu Inconel 625 są znacznie większe niż dla powszechnie stosowanych materiałów. W trakcie procesu zachodzą nieokreślone dotychczas zjawiska powodujące dodatkowy opór plastyczny.

Stosowane wzory teoretyczne w zakresie tłoczenia sprawdzające się przy innych mate-

riałach (stal węglowa, stal nierdzewna, aluminium i miedź), nie w pełni sprawdzają się przy kształtowaniu stopu niklu. W dalszych etapach badań kształtowania stopów niklu dotychczas stosowane wzory będą wymagały wprowadzenia współczynników korekcyjnych.

Mimo wymienionych niedogodności stop niklu Inconel 625 może być kształtowany metodami obróbki plastycznej. Należy jednak prowadzić dalsze badania procesów obróbki plastycznej tego stopu.

Dotyczy to szczególnie:

- badań wytłaczania i przetłaczania wytłoczek,
- badań kształtowania obrotowego z uwzględnieniem zginiatania obrotowego wydłużającego, rzutowego oraz wyoblania,
- określenia wpływu obróbki cieplnej na procesy kształtowania,
- wstępnych prób kształtowania obrotowego z zastosowaniem podgrzewania za pomocą lasera.

Wynikami tych badań są zainteresowane krajowe zakłady związane z przemysłem lotniczym oraz koncerny z zagranicy.

Pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej finansowanej przez Ministerstwo Edukacji i Nauki: BT 901 09 000 – Technologie i maszyny ze sterowaniem komputerowym do wyoblania i zginiatania obrotowego, szczególnie wyrobów długich o złożonych kształtach z wydłużoną poboczną.

6. LITERATURA

- [1] Lotnicza Norma Materiałowa: AMS 5599F, Nickel Alloy, Corrosion and Heat Resistant, Sheet, Strip and Plate 62Ni – 21,5 Cr – 9,0 Mo – 9,0(Cb+Ta), Annealed UNS NO6625.
- [2] Romanowski W.P: Poradnik Obróbki Plastycznej na zimno, WNT Warszawa 1976.
- [3] Drenger T., Wiśniewski J.: Kształtowanie obrotowe w powiązaniu z tradycyjnymi metodami obróbki plastycznej. Jubileuszowa XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Konstrukcja i technologia wytłoczek i wyprasek”, Poznań – Wąsowo, 17-19.06.2002 r. Instytut Obróbki Plastycznej s. 149 – 158.
- [4] Drenger T., Wiśniewski J. (i inni): Badania technologii kształtowania obrotowego wyrobów z blach w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. *Obróbka Plastyczna Metali* 2005 nr 1 s. 53 – 58.
- [5] Walter A., Malenko P.: Eksperimentalnoe issledowanije mechanizma deformacji przy rotacionnoj wytjazke. *Kuzn.-stampov. Proiz* 2004 nr 9 s. 9–11.
- [6] Praca INOP - BT 901 09 000 – Technologie i maszyny ze sterowaniem komputerowym do wyoblania i zgniatania obrotowego, szczególnie wyrobów długich o złożonych kształtach z wydłużoną poboczną (niepublikowana).