

ANALIZA PROCESU TŁOCZENIA BLACHY ZA POMOCĄ ELASTYCZNEGO STEMLA

Temperatura kształtowania należy do podstawowych parametrów obróbki plastycznej blach na ciepło. Podwyższona temperatura powoduje zmniejszenie oporu plastycznego wpływając na otrzymanie odpowiedniej podatności materiału do kształtowania. W badaniach, których wyniki przedstawiono w artykule, podjęto próbę modyfikacji procesu kształtowania osłony łożyska turbowentylatorowego, która jest wykonana z trudnoodkształcalnej stali nierdzewnej AMS5604. Materiał ten charakteryzuje się małym zapasem plastyczności, w związku z tym konieczne jest zastosowanie niekonwencjonalnego dwuetapowego procesu kształtowania: kształtowanie zarysu osłony na zimno stemplem elastycznym oraz późniejsza kalibracja kształtu w podwyższonej temperaturze za pomocą stempla metalowego. Przedstawiono również wyniki analizy metalograficznej oraz składu chemicznego blachy po kształtowaniu.

WSTĘP

Obróbka plastyczna metali i ich stopów jest metodą wytwarzania, w której z materiału pierwotnego powstaje wyrób o zmienionym kształcie i właściwościach fizyko-chemicznych poprzez użycie takich sposobów jak kształtowanie plastyczne, dzielenie lub łączenie. Zmiana właściwości fizyko-chemicznych odnosi się do zmiany struktury materiału, decydującej o jego właściwościach mechanicznych oraz chropowatości powierzchni.

Temperatura kształtowania należy do podstawowych parametrów obróbki plastycznej; powoduje zmniejszenie oporu plastycznego wpływając na otrzymanie odpowiedniej podatności materiałów do kształtowania [1]. Odpowiedni dobór temperatury obróbki i jej stabilizacja w możliwie zawężonym zakresie decyduje o jakości kształtowanych elementów. Temperatura obróbki plastycznej na półgorąco wiąże się z wykorzystaniem zmian oporu plastycznego kształtowanego materiału i odpowiednią wytrzymałością materiału narzędzi. Dobór odpowiedniej temperatury kształtowania powinien zapewnić odpowiednie warunki eksploatacji narzędzi oraz obniżenie oporów plastycznego płynięcia materiału.

Zależności naprężenia uplastyczniającego σ_p i odkształcenia granicznego ε^* od homologicznej temperatury obróbki określonej miarą stosunku temperatury obróbki T_o do temperatury topnienia materiału T_t , umożliwiając wydzielenie następujących zakresów temperaturowych obróbki plastycznej [1]:

- obróbka plastyczna na zimno – około $0,2 T_o/T_t$,
- obróbka plastyczna na ciepło – około $0,5 T_o/T_t$,
- obróbka plastyczna na gorąco – około $0,8 T_o/T_t$,
- kształtowanie powyżej temperatury solidusu.

Procesy przeróbki plastycznej metali realizowane na półgorąco mają na celu wyeliminowanie takich wad przeróbki na gorąco, jak intensywne utlenianie i zubożenie powierzchni wyrobów w węgiel, pozwalając jednocześnie na zmniejszenie oporu plastycznego w stosunku do kształtowania na zimno.

Zjawisko zmiany geometrii wyłoczek o złożonej geometrii jest także wynikiem niejednorodnych naprężeń w przekroju poprzecznym zgiętych blach oraz zjawiska sprężynowania [2-5], które zależy od mechanicznych właściwości giętego materiału oraz od parametrów geometrycznych procesu gięcia, takich jak kąt i promień gięcia,

szerokość i grubość arkusza, stosunek szerokości materiału do jego grubości oraz technologiczne parametry obróbki, np. wskaźnik naprężeń i temperatura, granica plastyczności materiału, skłonność do utwardzenia i mikrostruktura materiału [6]. Badania przeprowadzone przez Cardena i in. [7] pokazały wpływ tarcia na wartość sprężynowania blachy. Stachowicz i in. [8] badali wpływ metody ogrzewania, grubości blachy i temperatury na sprężynowanie arkusza stali nierdzewnej w warunkach obróbki na ciepło.

Wybór odpowiedniej temperatury obróbki i jej stabilizacja w możliwie ograniczonym zakresie decyduje o jakości obrabianych elementów [9]. Pomimo intensywnego wzrostu wykorzystania metod obróbki na ciepło w wielu dziedzinach przemysłu, nadal nie przeprowadzono gruntownych badań nad ustaleniem właściwej temperatury obróbki i jej wpływu na mechaniczne właściwości materiału. Badania w obrębie procesów obróbki blach na ciepło i na gorąco skupiają się na określaniu krzywej granicznej, właściwości mechanicznych i parametrów obróbki (temperatury materiału wyjściowego, metody ogrzewania, wskaźnika naprężeń itd.) stopów magnezu [np. 10, 11], aluminium [np. 12, 13], tytanu [np. 14] stali wysokiej wytrzymałości [np. 15, 16]. Elementy obrobione w podwyższonych temperaturach są powszechnie używane w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i okrętowym oraz w energetyce jądrowej.

W artykule przedstawiono wyniki badań, których celem była modyfikacja procesu kształtowania osłony łożyska turbowentylatorowego, która jest wykonana ze stali nierdzewnej AMS5604. Aby uzyskać odpowiedni kształt i dokładne wymiary produktu końcowego proces został podzielony na dwa etapy: obróbkę na zimno za pomocą elastycznego stempla i kalibrację kształtu wyłoczki na ciepło.

1. MATERIAŁ

Łożysko silnika wentylatorowego wykonano z blachy utwardzalnej martenzytycznej stali nierdzewnej AMS5604 o grubości nominalnej 1,00 mm. Skład chemiczny materiału blachy został przedstawiony w Tabeli 1. Próbę rozciągania zgodną z normą EN ISO 6892-1:2009 [17] wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej, aby określić podstawowe parametry mechaniczne materiału. W próbie tej wyznaczono granicę plastyczności σ_y , wytrzymałość na rozciąganie σ_u , wydłużenie A_{80} i współczynnik anizo-

tropii r. Współczynnik umocnienia C i wykładnik umocnienia n określono na podstawie aproksymacji krzywej odkształcenie-napężenie, którą można opisać używając równania Hollomona $\sigma_y = C\varphi^n$, gdzie φ to napężenie rzeczywiste.

Próbki użyte w próbie rozciągania wycięto w trzech kierunkach: wzdłuż kierunku walcowania (0°), poprzecznie do kierunku walcowania (90°) i pod kątem 45° do kierunku walcowania. Próbki były testowane dla wszystkich kierunków, a średnie wartości parametrów zaprezentowano w Tabeli 2. Wartości parametrów sprężystości, np. modułu Younga i współczynnika Poissona wynoszą odpowiednio 210 GPa i 0,3.

Tab. 1. Skład chemiczny arkusza stali nierdzewnej AMS5604 (wt. %).

Pierwiastek	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Nb
Zawartość	0,07	16,5	4,0	1,00	1,00	0,5	0,30

Tab. 2. Właściwości mechaniczne arkusza stali nierdzewnej AMS5604

Orientacja próbki	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	A_r	r (-)	C (MPa)	n (-)
0°	898	1145	0,047	0,76	3794	0,405
45°	930	1058	0,045	0,93	3633	0,402
90°	893	1021	0,035	0,95	3158	0,343

2. METODA

Celem badań było opracowanie technologii produkcji osłony łożyskowej silnika wentylatorowego zapewniającej otrzymanie produktu o określonym kształcie i dokładności wymiarowej. Osłona łożyska jest jednym z krytycznych elementów strukturalnych silnika, a dopuszczalny błąd w kształcie profilu osłony wynosi $\pm 0,25$ mm. Jako materiał wsadowy użyto blachy o stożkowym kształcie, którą przed obróbką spawano za pomocą metody TIG bez użycia dodatkowego materiału. Spoinę sprawdzono za pomocą Kontroli Fluorescencyjnej Detali (FPI) i radiografii (promienie rentgenowskie) pozwalających na wykrycie następujących wad: pęknięć skurczowych, wtrąceń, pęcherzy gazowych, wad powierzchniowych i braku przetopu. Z powodu małych tolerancji wymiarów obrabianych narzędzi i ryzyka ich zniszczenia w procesie obróbki, spoiny zostały walcowane z tolerancją wypukłości 0,1 mm. Wykonano również ocenę metalograficzną przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego i analizę składu chemicznego za pomocą spektroskopu rentgenowskiego z dyspersją energii

3. WYNIKI I DISKUSJA

Biorąc pod uwagę niską podatność obrabianego materiału na odkształcenia plastyczne (wysoki stosunek granicy plastyczności do wytrzymałości na rozciąganie) i wysoką wartość sprężynowania, zdecydowano podzielić proces obróbki na dwa etapy:

- obróbkę półwyrobu przy użyciu gumowego stempla (Rys. 1),
- kalibrację wytłoczki po ogrzaniu materiału do odpowiedniej temperatury.

Proces obróbki przy użyciu elastycznych narzędzi, np. gumowego stempla, ma wiele zalet takich jak elastyczność produkcji i opłacalność narzędzi. Elastyczne narzędzia pozwalają na uzyskanie produktu końcowych o różnym kształcie, często bardzo skomplikowanym. Główną zaletą tego rodzaju obróbki jest jej prostota [18]. Co więcej, umożliwia ona skrócenie czasu przygotowawczego do obróbki, zmniejszenie sprężynowania i poprawę jakości powierzchni [18-20]. Tłoczenie stożkowego kształtu pośredniego odbywa się w specjalnym tłoczniku umieszczonym na prasie hydro-mechanicznej

potrójnego działania o nacisku 160 MN z niezależnym ruchem stempla, matrycy i podkładki dociskowej.



Rys. 1. Gumowy stempel

Kiedy elastyczny stempel dotyka półwyrobu, komora urządzenia jest zamykana przez podkładkę dociskową. Dalsze przesunięcie prasy w górę wytwarza nacisk, który rozpoczyna proces obróbki blachy. W procesie kalibracji elastyczny stempel jest zastąpiony przez stempel metalowy. Metalowe matryce wykonane zostały z utwardzonej i trzykrotnie odpuszczanej stali Unimax®, a ich powierzchnie robocze zostały pokryte powłoką utworzoną w procesie fizycznego nakładania z fazy gazowej PVD (Physical Vapour Deposition). Po pierwszym etapie obróbki przekrój wytłoczki składa się z części cylindrycznej, która powoduje blokowanie się wytłoczki w matrycy. Minimalizacja sprężynowania jest możliwa poprzez zmianę wybranych parametrów procesu, a także korektę wymiarów oraz kształtu stempla i matrycy [21]. Korekta narzędzi zależy od wymuszenia dodatkowego doginania blachy.

Użyto dwóch elementów usztywniających (Rys. 2) pod kątem -5° względem profilu wytłoczki, aby zapewnić obróbkę okrągłych części przekroju. Przewidywanie ostatecznego kształtu wyrobu jest istotne z punktu widzenia projektanta narzędzi. Aby zabezpieczyć niższą część stożkowego półwyrobu przed fałdowaniem zastosowano dociskacz do górnej powierzchni kołnierza wytłoczki.



Rys. 2. Osłona łożyska silnika wentylatorowego

W ten sposób dodatkowe naprężenia rozciągające występujące w materiale uchronią blachę przed utratą stateczności. Niejednorodność odkształcenia wytłoczki zależy również od istnienia tarcia pomiędzy odkształcanym materiałem a narzędziami. Procesy zachodzące w strefie styku są zakłócone przez wiele czynników, takich jak naciski normalne, topografia powierzchni blachy i narzędzi, smar i temperatura procesu obróbki [22]. Właściwości blachy są również ważnym czynnikiem i ich nieodpowiednie uwzględnienie

powoduje fałdowanie, rozrywanie, wybożenia lub niepełne ukształtowanie części [23].

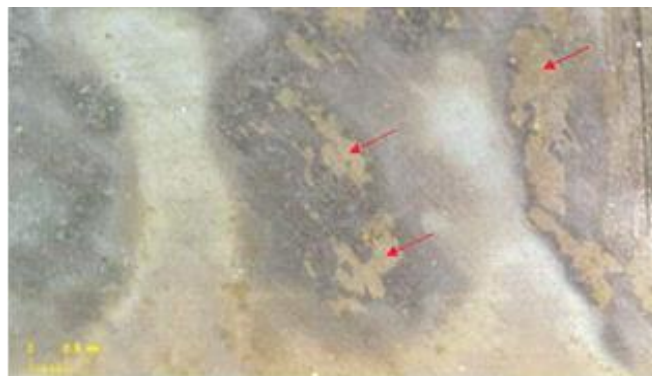
Istnieje konieczność wyeliminowania kilku problemów, które pojawiają się w procesie obróbki. Dwuetapowy proces przy użyciu elastycznego stempla (najpierw rozszerzanie górnej, a następnie dolnej części wylotczki) powodował wystąpienie pęknięć w połowie wysokości przekroju wylotczki. Po pierwszym kroku procesu obróbki za pomocą gumowego stempla, wyżarzanie i dalsza kalibracja na zimno nie może być zastosowana. Powodem jest znaczące zmniejszenie się wymiarów wylotczki podczas ogrzewania do temperatury wyżarzania. Ponadto, w związku ze zjawiskiem umocnienia odkształceniowego w procesie obróbki, twardość materiału wzrosła, co powoduje zmniejszenie się podatności blachy na odkształcenie.

Biorąc pod uwagę wspomniane powyżej problemy z obróbką blachy stalowej nierdzewnej AMS5504, zdecydowano na zastosowanie kalibracji wylotczki w podwyższonej temperaturze. Wylotczka stożkowa (Rys. 3) została nagrzana w piecu oporowym. Wylotczka została nagrzana do temperatury 830°C. Odbyło się to bez atmosfery gazu ochronnego. Proces ten wywołał utlenianie powierzchni, ale jest to dopuszczalne technologicznie. Na etapie przenoszenia wylotczki z pieca na matrycę, następuje szybkie oddawanie ciepła do otoczenia przez konwekcję i promieniowanie. Temperatura blachy na początku procesu kalibracji wynosiła około 560°C. Niekorzystnymi konsekwencjami wysokich oporów tarcia podczas obróbki na ciepło są [24, 25]: nierównomierne odkształcenia blachy, wzrost nacisku stempla wywołujący ryzyko pęknięcia, pogorszenie się jakości powierzchni wylotczek. Zła konstrukcja narzędzi obróbkowych wpływa na jakość końcowych elementów lub zwiększone zużycie narzędzi [23]. Aby chronić powierzchnie narzędzi przed zarysowaniem, smaruje się je smarem grafitowym.

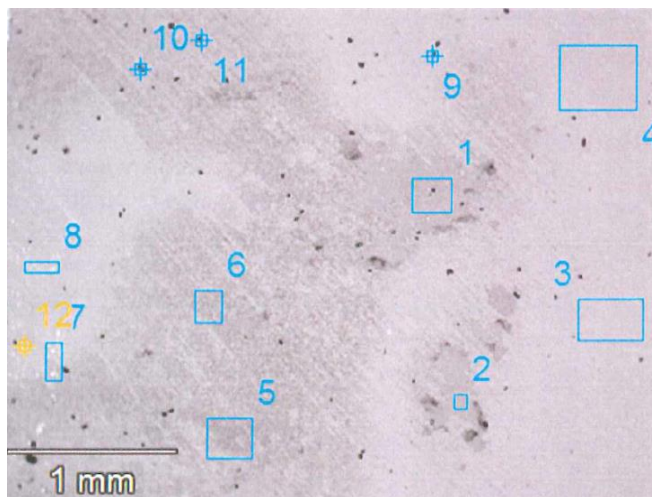
Wizualna ocena fragmentu wylotczki (Rys. 3) wykazała obecność plam na powierzchni (Rys. 4). Zmiany te istotne mają charakter przypowierzchniowy. Ponadto, zauważono wykruszenia na obszarach o zmienionej barwie. Badania metalograficzne na przekroju poprzecznym wykazały jednorodną mikrostrukturę w całym przekroju z wyjątkiem lokalnych utlenień na powierzchni. Nie zauważono istotnych różnic w mikrostrukturze pomiędzy badanymi próbkami na obszarach z plamami i bez nich. Wyniki analizy chemicznej powierzchni wylotczki wykonane metodą SEM EDS na obszarach zaznaczonych na rysunku 5, zostały zaprezentowane w Tabeli 3.



Rys. 3. Badany fragment wylotczki



Rys. 4. Naprężenia na powierzchni wylotczki

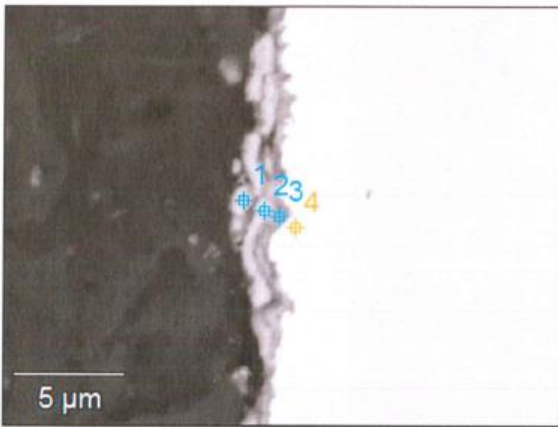


Rys. 5. Widok powierzchni wylotczki z zaznaczonymi obszarami, na których wykonana została analiza metodą SEM EDS

Tab. 3. Skład chemiczny wybranych obszarów próbki (stężenie masowe procentowe)

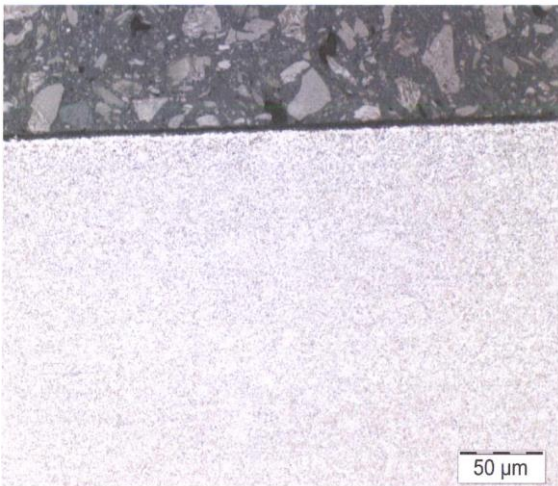
Numer punktu	O-K	Si-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-K	Cu-K	Ag-L
1	25.2	0.9	34.8	0.5	33.1	1.6	2.9	
2	24.1	0.9	33.9	0.5	35.5	1.3	2.9	
3	22.3	0.2	6.8	1.0	65.2		3.0	
4	21.7	0.5	15.8	1.0	56.0	0.7	3.0	
5	21.3	0.1	2.1	0.8	68.2		4.0	
6	21.0	0.1	2.3	0.8	68.2		4.2	
7	21.7	0.1	3.1	1.0	65.5		2.9	2.8
8	25.9	0.2	6.6	1.0	60.3		2.5	1.5
9	20.2	0.2	2.4	0.9	65.0		3.7	
10	26.0	0.1	5.5	1.0	62.1		2.9	
11	24.9	0.1	1.9	0.8	64.4		4.7	
12	26.7	0.1	3.6	0.8	57.7		2.7	6.7

Cała powierzchnia pokryta jest tlenkami. Zaobserwowano obszary z cząsteczkami Ag (punkty 7, 8 i 12). Największa różnica w zawartości widoczna jest dla Cr. Na powierzchni próbki istnieją dwa rodzaje tlenków, pierwszy z nich z wyższą zawartością Cr pokrył całą powierzchnię próbki (także obszary bez plam), natomiast drugi z nich, widoczny jedynie na obszarach o zmienionej barwie, zawiera głównie żelazo. Widać to na powiększonym obrazie powierzchni przekroju próbki z zaznaczonymi obszarami, na których wykonano analizę metodą SEM EDS – obszar o zmienionej barwie (Rys. 6). Można zaobserwować dwa wspomniane wcześniej rodzaje tlenków na obszarze z ciągłymi przebarwieniami o dużej zawartości Cr blisko powierzchni próbki.



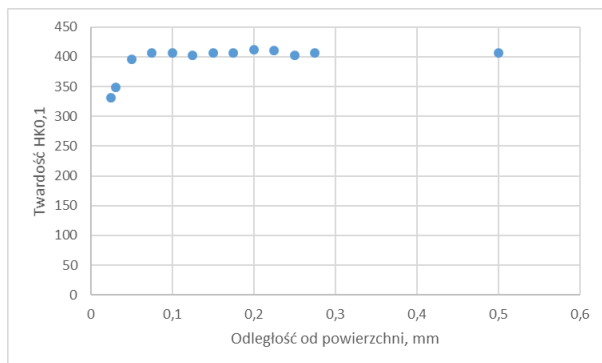
Rys. 6. Powiększony obraz powierzchni przekroju z próbki z zaznaczonymi obszarami, na których wykonano analizę metodą SEM EDS – obszar o zmienionej barwie

Po wytrawianiu odczynnikami Vilella nie zauważono różnicy w mikrostrukturze próbki, za wyjątkiem dodatkowej warstwy tlenku na obszarze z przebarwieniami (Rys. 7).



Rys. 7. Mikrostruktura próbki (wytrawianie odczynnikami Vilella)

Dokonano także pomiaru twardości w próbce pod przebarwieniami i na obszarach obok przebarwień. Wyniki pomiaru pod przebarwieniami przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Twardość HK 0,1 w zależności od odległości od powierzchni

W odległości 0,025 mm od powierzchni odnotowano najmniejszą wartość twardości, która wraz z odległością stopniowo się zwiększała, by ostatecznie osiągnąć poziom wartości oscylujący wokół 400HK w odległości od powierzchni równej 0,05mm i większej.

PODSUMOWANIE

W pracy artykule przedstawiono opracowaną stopniową obróbkę blachy stalowej nierdzewnej za pomocą gumy i kalibracji na ciepło. Na podstawie rezultatów doświadczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- Zastosowanie gumy wyeliminowało pęknięcia w wyłoczkach,
- Kalibracja końcowego kształtu wyłoczki umożliwiła usunięcie skurczu materiału w podwyższonej temperaturze, więc zarówno kształt, jaki i wymiary wyłoczki odpowiadają dopuszczalnym wartościom,
- Zastosowanie usztywnienia górnej i dolnej części osłony łożyska pod kątem ujemnym do tworzącej wyłoczki pozwoliło na uniknięcie fałdowania materiału,
- Badania metalograficzne przekroju poprzecznego wykazały jednorodną mikrostrukturę w całym przekroju z wyjątkiem lokalnych utlenień na powierzchni,
- Na powierzchni próbki istnieją dwa rodzaje tlenków, pierwszy z nich z wyższą zawartością Cr pokrył całą powierzchnię próbki, natomiast drugi z nich, widoczny jedynie na obszarach o zmienionej barwie zawiera głównie żelazo.

BIBLIOGRAFIA

1. Berkowski L., *Temperatura w obróbce plastycznej stopowych stali narzędziowych - Część I. Warunki odkształcenia*. Obr. Plast. Met., 17(2), 2006.
2. Boljanovic V., *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 2nd Edition. South Norwalk, CT: Industrial Press, 2014.
3. Davis J. R., *ASM Speciality Handbook. Stainless Steels*. Materials Park, OH: ASM International, 1994.
4. Tekaslan Ö., Gerger N., Seker U., *Determination of Spring-back of Stainless Steel Sheet Metal in "V" Bending Dies*, Mater. Des., vol. 29, 2008.
5. Ragai I., Lazim D., Nemes J. A., *Anisotropy and Springback in Draw-bending of Stainless Steel 410: Experimental and Numerical Study*, J. Mater. Proc. Technol., vol. 166, 2005.
6. Laurent H., Greze R., Manach P. Y., Thuillier S., *Influence of Constitutive Model on Springback Prediction Using the Spring-riding Test*, Int. J. Mech. Sci., vol. 51, 2009.
7. Carden W. D., Geng L. M., Matlock D. K., and Wagoner R. H., *Measurement of Springback*, Int. J. Mech. Sci., vol. 44, 2002.
8. Stachowicz F., Trzepieciński T., Pieja T., *Warm Forming of Stainless Steel Sheet*, Arch. Civ. Mech. Eng., vol. 10, 2010.
9. Boljanovic V., *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*, 2nd ed. South Norwalk, CT: Industrial Press, 2014.
10. Kurukuri S., Van den Boogaard A. H., Miroux A., Holmedal B., *Warm Forming Simulation of Al-Mg Sheet*, J. Mat. Proc. Technol., vol. 209, 2009.
11. Chang J. K., Takata K., Ichitani K., Taleff E. M., *Ductility of an Aluminium -4.4 wt. pct. Magnesium Alloy at Warm- and Hot-working Temperatures*, Mat. Sci. Eng., vol. A527, 2010.
12. Zhang C., Leotoing L., Guines D., Ragneau E., *Experimental and Numerical Study on Effect of Forming Rate on AA5086 Sheet Formability*, Mat. Sci. Eng., vol. A527, 2010.
13. Silva P. J. Alvares A. J., *Incremental sheet forming of aluminum with warm*, 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, 2015.
14. Ma J., Yang H., Li H., Wang D., Li G., *Tribological Behaviors Between Commercial Pure Titanium Sheet and Tools in Warm Forming*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 25, 2015.
15. Hussaini S. M., Krishna G., Gupta A. K., Singh S. K., *Development of Experimental and Theoretical Forming Limit Diagrams*

- for Warm Forming of Austenitic Stainless Steel 316," J. Manuf. Process., vol. 18, 2015.
16. Qu H. P., Chen H. T., Cao C. X., Lang Y. P., Zhang S. X., Cui Y., "Mechanism Research on Accelerated Embrittlement Phenomenon of a Warm-deformed Cr-Mn-Ni-Mo-N Austenitic Stainless Steel," Mater. Sci. Eng. A, vol. 680, 2017.
 17. ISO standard no. 6892-1:2009, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature.
 18. Sun Y. N., Wan M., Wu X. D., "Wrinkling Prediction in Rubber Forming of Ti-15-3 Alloy," Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 23, 2013.
 19. Maziar R., Mohd R. Z., Roslan A., "Computer Aided Modelling of Friction in Rubber-pad Forming Process," J. Mater. Process. Technol., vol. 209, 2009.
 20. Giuseppe S., "A Numerical and Experimental Approach to Optimise Sheet Stamping Technologies: Part II-Aluminum Alloys Rubber-forming," Mater. Des, vol. 22, 2001.
 21. Forcellese A., Fratini L., Gabrielli F., Micari F., "The Evaluation of Springback in 3D Stamping and Coining Processes," J. Mat. Proc. Technol., vol. 80-81, 1998.
 22. Kim H. and Kades N., "Friction and Lubrication," in Sheet Metal Forming. Fundamentals, T. Altan and A.E. Tekkaya, Eds. Materials Park, OH: ASM International, 2012.
 23. Ramezani M., Ripin Z. M., *Rubber-Pad Forming Processes. Technology and Applications*, Duxford: Woodhead Publishing, 2012.
 24. Lemu H. G., Trzepieciński T., "Numerical and Experimental Study of Frictional Behavior in Bending Under Tension Test," Stroj. Vestn.-J. Mech. Eng., vol. 59, 2013.
 25. Gelgele H. L., and Trzepieciński T., "Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method," Int. J. Mater. Form., vol. 4, 2011.

Analysis of stamping process using flexible punch

Forming temperature is one of the basic parameters of warm sheet metal forming. The elevated temperature reduces the deformation resistance and affects the susceptibility of the material to forming. In the investigations which results are presented in the article, an attempt was made to modify the forming process the bearing housing of fan engine. The housing is made of hardly-deformable stainless steel AMS5604. This material has low formability margin, and therefore, it is necessary to use non-conventional two-stage forming process: forming of preliminary shape in rubber-pad forming process and calibration of final shape at elevated temperature using a metallic dies. The paper presents also the results of metallographic analysis and chemical composition of the sheet after forming.

Autorzy:

Dr inż. **Irena Nowotyńska** – Politechnika Rzeszowska, im. Ignacego Łukasiewicza, Zakład Informatyki w Zarządzaniu, e-mail: i_nowot@prz.edu.pl

Mgr inż. **Tomasz Malinowski** – Pratt & Whitney Rzeszów S.A., e-mail: Tomasz.Malinowski@pwrze.utc.com

Dr inż. **Tomasz Pieja** – Pratt & Whitney Rzeszów S.A., Tomasz.Pieja@wskrz.com

Dr hab. inż. **Tomasz Trzepieciński** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Katedra Przeróbki Plastycznej, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl