

*AMS5604, stal odporna na korozję, właściwości mechaniczne
AMS5604, stainless steel, mechanical properties.*

Tomasz MALINOWSKI ¹
Maciej MOTYKA ²
Irena NOWOTYŃSKA ³
Feliks STACHOWICZ ⁴
Tomasz TRZEPIECIŃSKI ⁵

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BLACH ZE STALI ODPORNEJ NA KOROZJĘ AMS5604 W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE

Celem badań eksperymentalnych było określenie właściwości mechanicznych blachy nierdzewnej AMS5604 w temperaturze otoczenia (20°C) oraz w temperaturze podwyższonej w zakresie 50÷800 °C. Wyznaczono również wpływ prędkości odkształcenia na zmianę wartości podstawowych parametrów mechanicznych blachy. Próby statyczne rozciągania przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego na maszynie wytrzymałościowej Instron 5982 (100kN).

MECHANICAL PROPERTIES OF AMS5604 STAINLESS STEEL SHEETS AT ELEVATED TEMPERATURE

The aim of the experimental studies was to determine the mechanical properties of stainless steel AMS5604 at ambient and elevated temperature in the range of 50÷800 °C. The effect of strain rate on the change in the value of basic mechanical parameters of the sheet metal is also determined. The static tensile test is carried out at Research and Development Laboratory for Aerospace Materials using Instron 5982 100KN floor model universal testing system.

1. WSTĘP

Coraz większe oczekiwania co do jakości wykonania elementów części maszyn i urządzeń wymagają od inżynierów szczegółowej analizy procesów wytwarzania. Istotnym z punktu widzenia trwałości i niezawodności wytwarzanych części maszyn jest potrzeba minimalizacji kosztów produkcji przy zapewnieniu wysokiej jakości wyrobu finalnego. W takiej sytuacji na szczególną uwagę zasługują procesy plastycznego kształtowania materiałów. Procesy przeróbki plastycznej metali mają na celu kształtowanie metalu, nadawanie mu odpowiednich właściwości mechanicznych i fizycznych oraz osiągnięcie żądanej gładkości powierzchni przy stosunkowo niskiej liczbie operacji i bez konieczności lub w ograniczonym zakresie stosowania dodatkowej obróbki skrawaniem [1]. Oprócz odpowiedniego doboru procesu wytwarzania w praktyce inżynierskiej często dąży się do tego, aby dana część maszyny miała jak najmniejszą masę przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości czy możliwości pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Dążenie do uzyskania kompromisu pomiędzy kilkoma, czasem nawet sprzecznymi właściwościami materiału sprawia, że poszukuje się nowe rozwiązania w zakresie nowych materiałów, czy metod ich kształtowania.

Duży udział w obróbce plastycznej metali stanowią procesy tłoczenia blach, które umożliwiają produkcję szerokiej gamy części metalowych, poczynając od przemysłu motoryzacyjnego i lotniczego poprzez sprzęt gospodarstwa domowego i drobną galanterię metalową, a ostatnio również dla potrzeb inżynierii biomedycznej. Warunkiem poprawnej realizacji procesu wytlaczania jest, aby ścianka powstającej wytlóczki mogła w każdej chwili procesu przenieść niezbędne obciążenia. Nakłada to ograniczenie na stopień odkształcenia, który wyraża się umownie za pomocą współczynnika wytlaczania. Jeżeli współczynnik ten jest większy od pewnej wartości

¹ WSK „PZL Rzeszów” S.A., Wydział Mechaniczny; 35-078 Rzeszów; ul. Hetmańska 120, tel: + 48 17 854-65-59, e-mail: Tomasz.Malinowski@wskr.com

² Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, tel.: + 48 17 865-11-23, e-mail: motyka@prz.edu.pl

³ Politechnika Rzeszowska, Wydział Zarządzania; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, tel.: +48 17 865-18-94, e-mail: i_nowot@prz.edu.pl

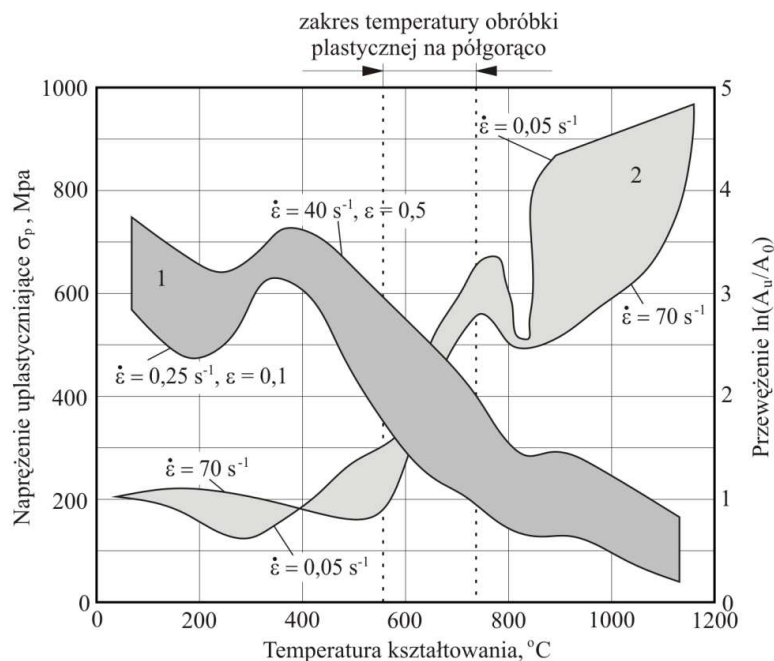
⁴ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, Tel: +48 17 865-15-38, e-mail: stafel@prz.edu.pl

⁵ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, Tel: +48 17 865-17-14, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

granicznej to proces przebiega prawidłowo. W przeciwnym przypadku dochodzi do silnego pocienienia ścianki i pęknięcia materiału w przekroju niebezpiecznym. Naprężenia obwodowe (ściskające) w kołnierzu mogą stać się przyczyną utraty stateczności blachy (pofałdowania kołnierza). Analiza wyników – polegająca na porównaniu wartości wyznaczonych wskaźników z przyjętymi wartościami granicznymi (krytycznymi) – pozwala na ocenę stopnia przydatności materiału do przetwarzania w danym procesie lub operacji technologicznej [2].

Jednoznaczne stwierdzenie, czy dany materiał nadaje się do kształtowania w konkretnym procesie lub operacji obróbki plastycznej na podstawie znajomości jego właściwości plastycznych zwykle nie jest możliwe. Jest to spowodowane specyficznymi cechami i warunkami realizacji procesów, a zwłaszcza występowaniem zróżnicowanych stanów naprężenia i odkształcenia w poszczególnych fazach kształtowania, nawet w obrębie jednego wyrobu kształtowanego. Podczas wytłaczania w strefie kołnierza występuje ściskanie obwodowe i rozciąganie promieniowe, w powstającej ściance i dnie wytłoczki - dwuosiowe rozciąganie, oraz – dodatkowo – zginanie na zaokrąglonej krawędzi płyty ciągowej. W związku z tym materiał winien mieć dobre właściwości plastyczne i niską granic plastyczności tylko w strefie kołnierza i w obszarze gięcia – natomiast powstająca ścianka wytłoczki powinna mieć dużą wytrzymałość. Analiza możliwości wykonania za pomocą tłoczenia różnorodnych wyrobów o złożonych kształtach wymaga znajomości tzw. krzywych odkształceń granicznych, których wyznaczanie (doświadczalne lub teoretyczne) stanowi poważny problem [2].

W praktyce przemysłowej często istnieje potrzeba podwyższenia właściwości wytrzymałościowych materiału oraz odporności na wpływ środowiska, czemu z kolei często towarzyszy zmniejszenie właściwości plastycznych. Do tego typu materiałów należą stale odporne na korozję. Popyt na stale nierdzewne wzrasta w różnych obszarach w tym w branży elektronicznej, motoryzacyjnej i budownictwie ze względu ich wysoką odporność na korozję, wysoką wytrzymałość mechaniczną i dobry wygląd powierzchni. Jednocześnie rozwój technik wykorzystujących zaawansowane procesy formowania blach ze stali nierdzewnej [3-6] ciągle trwa, ponieważ plastyczność stali nierdzewnych w różnych warunkach realizacji procesów kształtowania nie została jeszcze dokładnie zbadana. Do kształtowania plastycznego części z materiałów trudnoodkształcalnych coraz częściej stosowana jest przeróbka plastyczna na półgorąco. Podział procesów przeróbki plastycznej na zimno, półgorąco oraz gorąco dokonywany jest na podstawie względnej temperatury kształtowania T_k odniesionej do temperatury topnienia T_l danego metalu. Zazwyczaj przyjmuje się, że kształtowanie w zakresie temperatur $T_k < 0,35 T_l$ dotyczy przeróbki na zimno, zakres temperatur $T_k > 0,55 T_l$ to przeróbka plastyczna na gorąco, natomiast przeróbka plastyczna na półgorąco realizowana jest w zakresie temperatur $0,35 T_l < T_k < 0,55 T_l$ [7]. W przypadku stali zakres kształtowania na półgorąco dotyczy temperatur 720÷1020 K [8]. Ustalenie zakresu temperatur przeróbki plastycznej na półgorąco można przeprowadzić na podstawie wykresów zależności naprężenia uplastyczniającego od funkcji temperatury, uwzględniających wpływ prędkości odkształcenia oraz przewidywanych odkształceń materiału (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowe charakterystyki materiału (stal węglowa 15) służące do wyznaczania zakresu temperatur przeróbki plastycznej na półgorąco: 1– pole zmian wartości naprężenia uplastyczniającego dla różnych prędkości odkształcenia, 2– pole zmian wartości przewężenia dla różnych prędkości odkształcenia, opracowano na podstawie [9]

W warunkach obróbki plastycznej na półgorąco zachodzą procesy zdrowienia statycznego i dynamicznego oraz rekryształizacji statycznej. Występowanie tych procesów w górnym zakresie obróbki plastycznej stali na półgorąco sprawia, że w wąskim zakresie temperatury (bliskiej A_1) występuje wyraźna poprawa odkształcalności [10].

Yi i inni [11] przeprowadzili badania dotyczące kształtowania na półgorąco wylózek ze stopów magnezu AZ31 i ZE10. Podobne badania przeprowadzili Mekonen i inni [12] dla stopów AZ31 i ZE10 rozwijając konstytutywne równanie opisujące zachowanie materiału. Palumbo i inni [13], Ren i inni [14] oraz Lee i inni [15] badali wpływ prędkości kształtowania i temperatury narzędzia na głębokość tłoczenia dla stopu magnezu AZ31. Chang i inni [16] przeprowadzali symulacje z wykorzystaniem metody elementów skończonych procesu kształtowania na półgorąco wylózek ze stopu AZ31 i otrzymali zgodność z wynikami badań eksperymentalnych. Podobne badania przeprowadzili Lee i inni [17]. Obszerne badania eksperymentalne i numeryczne dotyczące kształtowania wylózek przy różnych temperaturach narzędzia dotyczą głównie stopów magnezu i aluminium [17-20, 21].

Natomiast zachowanie i odkształcalność blachy nierdzewnej w procesie wyłaczania są przedmiotem nielicznych badań. Takuda i inni [4] przeprowadzali eksperymenty kształtowania na półgorąco wylózek z austenitycznej stali nierdzewnej i badali rozkład martenzytu w próbkach po badaniach. Iguchi i Ujio [6] badali wpływ gradientów temperatury na plastyczność stali ferrytycznej. Stachowicz i inni [3] badali wpływ temperatury na właściwości mechaniczne (m.in. takie jak granica plastyczności) i na sprężynowanie w teście zginania V dla stali odpornej na korozję.

Rozwój metod komputerowych, a zwłaszcza wykorzystanie metody elementów skończonych (MES) w modelowaniu matematycznym rzeczywistych procesów technologicznych stwarza szerokie możliwości przewidywania zachowania się materiałów w różnorodnych warunkach ich obróbki (przetwarzania) na podstawie znajomości parametrów materiałowych określanych w trakcie standardowych badań strukturalnych, badań właściwości wytrzymałościowych, plastycznych itp. Jednak stopień komplikacji niektórych realnych procesów technologicznych jest tak znaczny, że ich modelowanie numeryczne napotyka trudności gdyż liczba parametrów, które muszą być uwzględnione, aby uzyskać adekwatny opis przebiegu procesu i zachowania się materiału jest bardzo duża.

Doświadczalna identyfikacja tych parametrów (różnorodnych stałych i funkcji materiałowych) może okazać się trudna, pracochłonna i daleko wykraczająca poza zakres badań standardowych. Ponadto materiały wykazują naturalne rozrzuty właściwości, co dodatkowo utrudnia wszelkie analizy teoretyczne. Należy dodać, że wiele prób technologicznych, sprawdzonych w praktyce, stanowi przedmiot zaleceń normatywnych, co zapewnia ustalone warunki ich realizacji. Próby realizowane w identycznych warunkach, na takiej samej aparaturze i przy użyciu jednakowego oprzyrządowania wykazują na ogół wystarczającą dokładność i powtarzalność wyników dla celów badań odbiorczych i porównawczych [2].

Mimo przeprowadzonych badań dotyczących różnych parametrów procesu i ich wpływu na właściwości materiału dla różnych metali, a wspomnianych wcześniej, nie ma dokładnych badań dotyczących stali nierdzewnej. Dlatego też, w celu uzyskania bardziej szczegółowych informacji na temat zachowania się stali nierdzewnej w procesie wyłaczania na półgorąco, istnieje konieczność przeprowadzenia dodatkowych badań w tym zakresie. Ponadto badania dotyczące anizotropii stali nierdzewnej i związane z tym modele konstytutywne są bardzo ograniczone, jednakże wiadomo, że duża anizotropowość wpływa na plastyczność materiału [2, 9, 11, 22].

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Celem badań eksperymentalnych było określenie właściwości mechanicznych blachy nierdzewnej AMS5604 o grubości 1,6 mm w temperaturze otoczenia (20°C) oraz w temperaturze podwyższonej w zakresie $50\div 800^{\circ}\text{C}$. Określono również wpływ prędkości odkształcenia na zmianę wartości podstawowych parametrów mechanicznych blachy. Próbę statyczną rozciągania przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego na maszynie wytrzymałościowej Instron 5982 (100 kN). Warunki realizacji próby rozciągania:

- próbki płaskie o szerokości 12,5 mm,
- długość bazy pomiarowej ekstensometru do rejestracji wydłużenia: 50 mm,
- prędkość przemieszczania trawersy: $3,33\cdot 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,66\cdot 10^{-4}$ oraz $0,0005\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- temperatura odkształcania T_0 : 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 i 800°C ,
- nie stosowano atmosfery ochronnej.

Po zerwaniu próbek przeprowadzono pomiary szerokości i grubości blachy w miejscu zerwania w celu określenia wartości przewężenia Z .

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

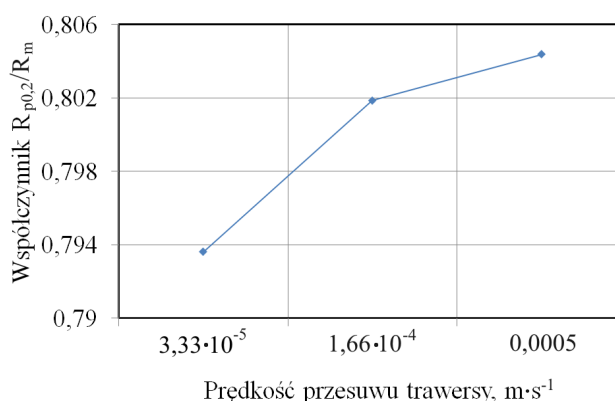
W badaniach wyznaczono wartości podstawowych parametrów mechanicznych blachy: umowną granicę plastyczności $R_{p0,2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m , wydłużenie całkowite A_{50} oraz przewężenie procentowe przekroju Z (tab. 1).

Tabela 1. Uśrednione wyniki próby jednoosiowego rozciągania przeprowadzonej na zimno oraz w zakresie temperatur $50\div 800$ °C z prędkością $3,33\cdot 10^{-5}$ m·s⁻¹

$T_o, ^\circ\text{C}$	$R_{p0,2}, \text{MPa}$	R_m, MPa	$A_{50}, \%$	$Z, \%$
20	996	1255	7,0	14,5
50	988	1149	7,8	15,0
100	980	1122	7,0	17,0
200	987	1155	6,0	17,5
300	990	1104	8,0	16,7
400	995	1115	9,0	21,0
500	760	909	17,0	32,1
600	370	456	30,0	55,2
700	167	220	110,0	86,8
800	98	135	122,0	75,6

Jednym z istotniejszych wskaźników podatności blachy na głębokie tłoczenie w temperaturze otoczenia jest wartość współczynnika tzw. zapasu plastyczności, będącego stosunkiem granicy plastyczności materiału do jego wytrzymałości na rozciąganie $R_{p0,2}/R_m$. Dla większości gatunków stali tłocznych występuje zależność, że im mniejszy stosunek $R_{p0,2}/R_m$ tym większa jest wartość przewężenia. Współczynnik zapasu plastyczności dla blach stalowych głębokotłocznych nie powinien być większy niż 0,7 [23]. Powyżej tej wartości występuje znacznie utrudnione tłoczenie ze względu na konieczność zastosowania większych sił i możliwości szybszej utraty stateczności przez materiał [23].

Dla analizowanej blachy wartości współczynnika $R_{p0,2}/R_m$, zależnie od prędkości ruchu tawersy maszyny podczas testu jednoosiowego rozciągania realizowanego na zimno, przekraczają wartość 0,79 (rys. 2), a więc granica plastyczności bliska jest wartości wytrzymałości na rozciąganie. W odniesieniu do prędkości przesuwu tawersy $3,33\cdot 10^{-5}$ m·s⁻¹ stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości ruchu tawersy tłocznosci blach wyrażona stosunkiem $R_{p0,2}/R_m$ nieznacznie zmniejsza się, o około 0,008 dla prędkości $1,66\cdot 10^{-4}$ m·s⁻¹ oraz o około 0,01 dla prędkości $0,0005$ m·s⁻¹.

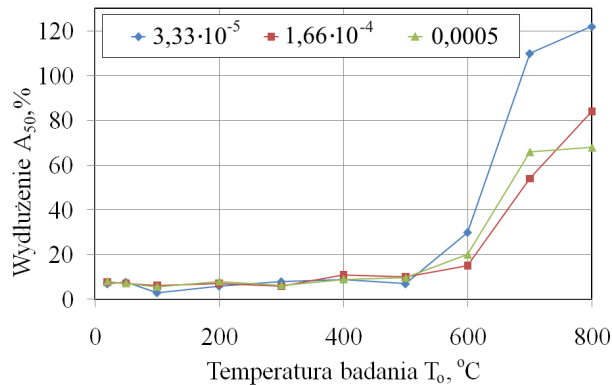


Rys. 2. Wpływ prędkości przesuwu tawersy na wartość współczynnika $R_{p0,2}/R_m$ uzyskany w próbie jednoosiowego rozciągania w temperaturze otoczenia

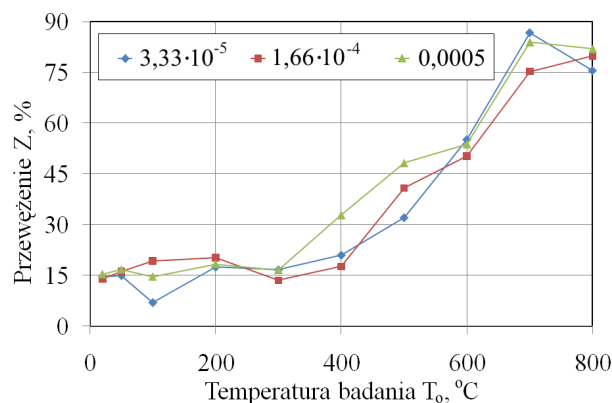
W zakresie temperatury badania $50\div 500$ °C nie zaobserwowano wyraźnego wpływu temperatury na wartość współczynnika zapasu plastyczności. Wytlumaczeniem może być charakter zmian wartości granicy plastyczności i wytrzymałości ze wzrostem temperatury (tab. 1). W temperaturze 50 °C oraz 400 °C zaobserwowano niemal taką samą wartość granicy plastyczności tj. około 995 MPa. Dopiero po przekroczeniu temperatury 500 °C obserwuje się monotoniczny spadek wartości współczynnika zapasu plastyczności, dla wszystkich

analizowanych prędkości ruchu tawersy: w zakresie temperatury 500÷800 °C dla prędkości ruchu tawersy $3,33 \cdot 10^{-5}$ oraz $0,0005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; w zakresie temperatury 500÷700°C dla prędkości ruchu tawersy $1,66 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Podczas jednoosiowego rozciągania próbek w zakresie wartości temperatury 20÷500 °C nie zaobserwowano istotnych zmian w wartości wydłużenia całkowitego A_{50} (rys. 3). Przekroczenie temperatury rozciągania próbek powyżej 500 °C skutkowało bardzo wyraźnym wzrostem wartości wydłużenia całkowitego A_{50} . Dla prędkości przesuwu tawersy $1,66 \cdot 10^{-4}$ oraz $0,0005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ występuje stała tendencja wzrostowa wartości przewężenia Z w zakresie temperatur 20÷700°C (rys. 4). W temperaturze badania 100 °C podczas badania z prędkością $3,33 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, wartość przewężenia Z zmniejszyła się o około 50% w stosunku do wartości przewężenia dla sąsiednich temperatur badania tj. 50°C i 200 °C.



Rys. 3. Wpływ temperatury badania na wartość wydłużenia A_{50} dla trzech prędkości przesuwu tawersy ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)



Rys. 4. Wpływ temperatury badania na wartość przewężenia Z dla trzech prędkości przesuwu tawersy ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Uwzględniając wartość współczynnika zapasu plastyczności oraz wartość przewężenia całkowitego podczas kształtowania można uznać, że optymalną temperaturą obróbki jest temperatura 600 °C. W dalszym etapie proponowaną optymalną temperaturę obróbki należy zweryfikować z badaniami skłonności materiału do umocnienia odkształceniowego w podwyższonych temperaturach.

Badania wytrzymałościowe blachy gatunku AMS5604 przedstawione w pracy [8] wykazały, że przekroczenie temperatury rozciągania próbek powyżej 500 °C skutkowało bardzo wyraźnym zmniejszeniem się skłonności materiału do umocnienia odkształceniowego. Uwzględniając, dodatkowo, wyniki przeprowadzonych badań właściwości mechanicznych można stwierdzić, że odpowiednią temperaturą przeróbki plastycznej na gorąco wytłoczek z blachy odpornej na korozję będzie temperatura 500 °C.

4. WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można nakreślić następujące wnioski:

- podczas próby jednoosiowego rozciągania przeprowadzanej w temperaturze pokojowej nie stwierdzono wyraźnego wpływu prędkości przesuwu tawersy maszyny wytrzymałościowej na wartość współczynnika zapasu plastyczności,

- podczas jednoosiowego rozciągania próbek w zakresie wartości temperatury 20÷500 °C nie zaobserwowano istotnych zmian w wartości wydłużenia całkowitego A_{50} ,
- przekroczenie temperatury rozciągania próbek powyżej 500 °C skutkowało bardzo wyraźnym wzrostem wartości wydłużenia A_{50} ,
- dla prędkości przesuwu trawersy $1,66 \cdot 10^{-4}$ i $0,0005$ m·s⁻¹ występuje stała tendencja wzrostowa wartości przewężenia Z w zakresie temperatur 20÷700 °C.

Istotnym czynnikiem ograniczającym proces tłoczenia na zimno blach odpornych na korozję gatunku AMS5604 jest niedostateczny zapas plastyczności, utrudniający prowadzenie procesu kształtowania oraz przekładający się na ograniczone możliwości eksploatacyjne pod względem odporności na pękanie przy statycznym obciążeniu rozciągającym.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: *Teoretyczne podstawy technologicznych procesów przeróbki plastycznej*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1977.
- [2] Stachowicz F., Spišak E.: *Sposoby oceny zdolności blach cienkich do kształtowania plastycznego na zimno*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1998.
- [3] Stachowicz F., Trzepieciński T., Pieja T.: *Warm forming of stainless steel sheet*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10, 2010, s. 85-94.
- [4] Takuda H., Mori K., Masachika T., Yamazaki E., Watanabe Y.: *Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing*. Journal of Materials Processing Technology, 143-144, 2003, s. 242-248.
- [5] Lonardelli I., Bosetti P., Bruschi S., Molinari A.: *On the formability and microstructural characteristics of AISI 301 parts formed by single-point incremental forming*. Key Engineering Materials, 2011, 473, s. 869-74.
- [6] Iguchi T., Ujio T.: *Effect of imposing temperature gradient in stretch forming process for ferritic stainless steel sheets*. In: Proceedings of 10th international conference on numerical methods in industrial forming processes, 1252, 2010, s. 1193-1200.
- [7] Frechard S., Redjaimia A., Lach E., Lichtenberger A.: *Mechanical behaviour of ni-trogen-alloyed austenitic stainless steel hardened by warm rolling*, Materials Science Engineering, A415, 2006, s. 219-224.
- [8] Pieja T.: *Kształtowanie na półgorąco wytłoczek ze stali odpornej na korozję*. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, 2009.
- [9] Marciniak Z.: *Non-uniformity of strains in shearing within the warm-forming temperature range*, International Journal of Mechanical Sciences, 29, 1987, s. 721-731.
- [10] Berkowski L.: *Berkowski L.: Stale szybko tnące na narzędzia do obróbki plastycznej*. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 1994.
- [11] Yi S., Bohlen J., Heinemann F., Letzig D.: *Mechanical anisotropy and deep drawing behaviour of AZ31 and ZE10 magnesium alloy sheets*. Acta Materialia, 58, 2010, s. 592-605.
- [12] Mekonen M.N., Steglich D., Bohlen J., Letzig D., Mosler J.: *Mechanical characterization and constitutive modeling of Mg alloy sheets*. Materials Science Engineering A, 540, 2012, s. 174-86.
- [13] Palumbo G., Sorgente D., Tricarico L., Zhang SH, Zheng WT.: *Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy AZ31*. Journal of Materials Processing Technology, 191, 2007, s. 342-346.
- [14] Ren L.M., Zhang S.H., Palumbo G., Sorgente D., Tricarico L.: *Numerical simulation on warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 sheets*. Materials Science Engineering A, 499, 2009, s. 40-44.
- [15] Zhang S.H., Zhang K., Xu Y.C., Wang Z.T., Xu Y., Wang Z.G.: *Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures*. Journal of Materials Processing Technology, 185, 2007, s. 147-151.
- [16] Chang Q.F., Li D.Y., Peng Y.H., Zeng X.Q.: *Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet*. International Journal of Machine Tools Manufacture, 47, 2007, s. 436-43.
- [17] Lee Y.S., Kim M.C., Kim S.W., Kwon Y.N., Choi S.W., Lee J.H.: *Experimental and analytical studies for forming limit of AZ31 alloy on warm sheet metal forming*. Journal of Materials Processing Technology, 187-188, 2007, s. 103-107.
- [18] Zhang K.F., Yin D.L., Wu D.Z.: *Formability of AZ31 magnesium alloy sheets at warm working conditions*. International Journal of Machine Tools Manufacture, 46, 2006, s. 1276-1280.
- [19] Takuda H., Mori K., Masuda I., Abe Y., Matsuo M.: *Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction*. Journal of Materials Processing Technology, 120, 2002, s. 412-418.
- [20] Li D., Ghosh A.K.: *Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 145, 2004, s. 281-93.

- [21] Lee M.H., Kim H.Y., Kim H.J., Choi Y.C., Oh S.I.: *Numerical modeling of magnesium alloy sheet metal forming at elevated temperature*. Jose M. A. Cesar de Sa, Abel D. Santos (Eds.), AIP Conference Proceedings, 908, 2007, s. 569-574.
- [22] Trzepieciński T.: *3D elasto - plastic FEM analysis of the sheet drawing of anisotropic steel sheet metals*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10, 2010, s. 95-106.
- [23] Burdek M.: *Wpływ topografii powierzchni na właściwości technologiczne metalowych wyrobów płaskich*. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 1, 2010, 244-249.