

STANOWISKO DO BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH STOPÓW ALUMINIUM W PODWYŻSZONYCH TEMPERATURACH

Jan BARTOSZEWICZ*, Andrzej SEWERYN**

* doktorant, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

** Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

j.bartoszewicz@doktoranci.pb.edu.pl, a.seweryn@pb.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono stanowisko do badań właściwości mechanicznych materiałów w podwyższonych temperaturach, składające się z maszyny wytrzymałościowej MTS 858 MiniBionix wraz z oryginalnymi, (zaprojektowanymi i wykonanymi) specjalnymi uchwytami hydraulicznymi. Zaadaptowano także komorę środowiskową MTS 651. Do wyznaczenia przemieszczenia odcinka pomiarowego został użyty wideoekstensometr ME 46 firmy MESSPHYSIK. Wideoekstensometr ME 46 umożliwia bezdotykowy pomiar przemieszczenia oraz śledzenie pomiarów „on-line” na ekranie komputera. Może być on używany w szerokim zakresie pomiarowym – umożliwia swobodny wybór bazy pomiarowej. Wykonano również serię badań polegających na monotonicznym rozciąganiu próbek ze stopu aluminium EN-AW 2024 w podwyższonych temperaturach: 20°C, 100°C, 150°C i 200°C, w celu wyznaczenia właściwości sprężysto-plastycznych, a w szczególności krzywej umocnienia. Wykonano także badanie sprawdzające - porównano działanie wideoekstensometru oraz tradycyjnego ekstensometru osiowego.

1. WPROWADZENIE

Rzeczywiste konstrukcje mogą być eksploatowane w warunkach złożonego stanu obciążenia, a często także w podwyższonej temperaturze. Sytuację taką mamy w przypadku maszyn i urządzeń energetycznych, procesowych i technologicznych, a także w sytuacji wystąpienia pożaru. Biorąc pod uwagę warunki eksploatacji należy przewidywać trwałość i wytrzymałość konstrukcji nie tylko w temperaturze pokojowej, ale także w podwyższonej temperaturze. Szczególnie ważne jest określenie, które właściwości mechaniczne i w jakim stopniu ulegają zmianie wraz ze wzrostem temperatury. Ma to duże znaczenie w prognozowaniu niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji.

I tak np. w pracy Meeny (2010), przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych dostępnych na rynku stopów aluminium w celu określenia ich przydatności do stosowania w podwyższonej temperaturze. Zauważono, że w teście jednoosiowego rozciągania wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się wytrzymałość, a zwiększa plastyczność materiału.

Podwyższona temperatura ma wpływ również na właściwości technologiczne metali, a w szczególności stopów aluminium. W temperaturze pokojowej mają one mniejszą ciągliwość oraz formowalność, tym samym podwyższenie temperatury wpływa na polepszenie właściwości technologicznych. Prowadzi to do zwiększenia wydajności procesów technologicznych (Li i inni, 2002; van Haaren i inni, 2004). Elementy po tłoczeniu w temperaturze pokojowej mają często nierówną powierzchnię. Te niepożądane wady powierzchniowe można wyeliminować poprzez procesy formowania w podwyższonej temperaturze. Tym samym polepszają się właściwości użytkowe wyrobu (Toros i inni, 2008; Abedrabbo i inni, 2006).

Istnieją również stopy aluminium (takie jak Al-Fe-V, Al-Fe-Mo, Al-Cr-Ni i Al-Ni-Mn), które mają stabilne właściwości mechaniczne do temperatury 350°C. Są one wykorzystywane jako materiały na elementy konstrukcyjne samolotów i śmigłowców, takie jak wały napędowe, niektóre obudowy silnika, przednie krawędzie, wloty powietrza, a także rury na gorące powietrze w klimatyzacji samolotów poddźwiękowych (Barbaux i inni, 1993).

Wymienione konstrukcje są narażone na obciążenia zmienne w czasie oraz długookresowe, coraz częściej w podwyższonej i wysokiej temperaturze, gdzie głównym mechanizmem uszkodzenia jest zmęczenie cieplno-mechaniczne. Tym samym w projektowanych elementach takich konstrukcji powinny być uwzględniony wpływ czynników: podwyższonej temperatury, czasu przebywania w tej temperaturze oraz obciążenia zmiennego (Kauffman, 2008; Kaufman i inni, 2007).

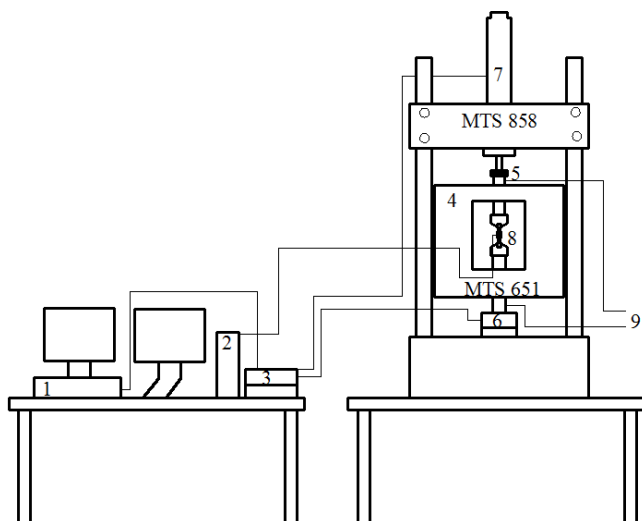
Badania (eksperyment i modelowanie) dotyczące wymienionej powyżej tematyki obarczone są wysokim stopniem trudności. Spowodowane jest to sprzężeniem wielu zjawisk, wśród których należy wymienić procesy plastycznego płynięcia z efektem umocnienia, a także procesy rozwoju uszkodzeń i pękania z efektem osłabienia, oba silnie zależne od temperatury.

Celem niniejszej pracy było przedstawienie nowego stanowiska umożliwiającego badanie eksperymentalne monotonicznego rozciągania próbek gładkich i z karami w podwyższonej temperaturze. W stanowisku wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS 858 MiniBionix wraz z oryginalnymi (zaprojektowanymi i wykonanymi) specjalnymi uchwytami hydraulicznymi. Zaadaptowano także komorę środowiskową MTS 651. Do pomiaru przemieszczenia bazy pomiarowej podczas badań w podwyższonych temperaturach wykorzystano wideoekstensometr ME 45.

W pracy przedstawiono także wstępne wyniki badań doświadczalnych rozciągania próbek ze stopu aluminium EN-AW 2024 w podwyższonej temperaturze 100°C, 150°C i 200°C.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko do badań próbek ze stopów aluminium w teście jednoosiowego rozciągania – ściskania (lub dwuosiowego rozciągania – ściskania i skręcania) w podwyższonej temperaturze przedstawiono na Rys. 1. Podstawą stanowiska jest programowalna, serwohydrauliczna, dwuosiowa maszyna wytrzymałościowa MTS 858 MiniBionix, sterowana za pomocą systemu FlexTest SE. Zakres obciążenia rozciągającego (ściskającego), zadawany na maszynie wynosi $\pm 25\text{kN}$, a momentu skręcającego $\pm 200\text{ Nm}$. Maszynę wyposażono w specjalne uchwyty hydrauliczne do badań w podwyższonej temperaturze. Ponadto w skład stanowiska wchodzi komora środowiskowa MTS 651, stelaż nośny do przemieszczania komory środowiskowej oraz wideoekstensometr ME 46 (Rys.2).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – komputer z oprogramowaniem użytkowym MTS, 2 – komputer z oprogramowaniem MESSPHYSIK, 3 – sterownik cyfrowy FlexTest SE maszyny wytrzymałościowej MTS 858 MiniBionix, 4 – komora środowiskowa MTS 651, 5 – ruchoma głowica maszyny, 6 – głowica siły, 7 – serwowzawór z czujnikiem pomiaru przemieszczenia, 8 – wideoekstensometr ME45, 9 – układ chłodzenia uchwytów

Działanie uchwytów oparte jest na zasadzie siłownika hydraulicznego, w którym olej hydrauliczny przemieszczając się przesuwa tuleję zewnętrzną w dół – zaciska próbkę w szczękach uchwytu, a przemieszczając się w przeciwnym kierunku – umożliwia odblokowanie próbek ze szczęk (patrz Rys. 3). W uchwytach zastosowano szereg uszczelnień pomiędzy tulejami, komorami spustowymi siłownika oraz w układzie chłodzenia uchwytów (dobrane z katalogu uszczelnień). Tuleja oraz chwyt połączone za pomocą połączenia gwintowego. Zapewniona jest również możliwość przeprowadzania badań w dwuosiowym stanie obciążenia

(rozciąganie – ściskanie i skręcanie) – blokowanie obrotu uchwytu możliwe jest dzięki klinom. Szczęki natomiast są osadzone na powierzchniach wewnętrznych chwytu.

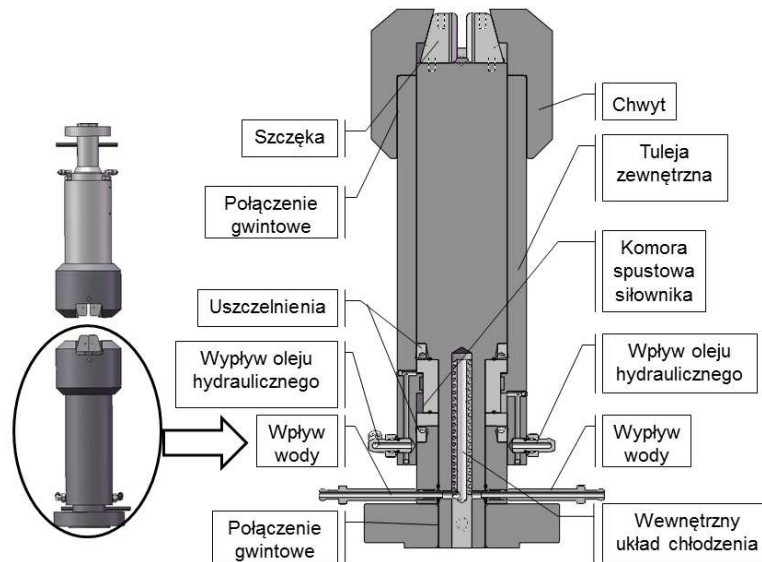


Rys. 2. Konfiguracja konstrukcji nośnej wraz z uchwytami, komorą środowiskową oraz wideoekstensometrem

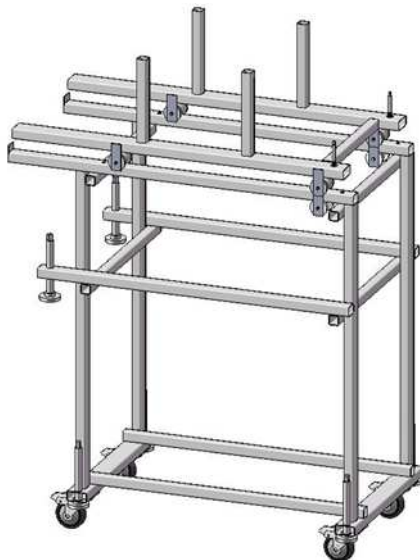
Uchwyty podczas badania są umieszczone w komorze środowiskowej, zaś ich części hydrauliczne znajdują się na zewnątrz tej komory, dzięki czemu nie zostają one narażone na bezpośrednie działanie podwyższonej temperatury. W celu lepszej kompensacji temperatury, układ hydrauliczny jest chłodzony przez wbudowany wewnątrz uchwytów system chłodzenia. Płyn chłodniczy wpływa przez wewnętrzną rurkę i wypływa po naciętym spiralnie rowku wewnątrz trzpienia uchwytu do układu chłodzenia płynu, włączonego w system chłodzenia maszyny wytrzymałościowej.

Komora środowiskowa MTS 651 (Rys. 2) umożliwia badanie próbek z wykonanych ze zróżnicowanych materiałów zarówno w obniżonej, jak i podwyższonej temperaturze. Zakres temperatury powietrza w komorze wynosi od -129°C do 315°C , z szybkością grzania powietrza do 315°C w czasie 30 minut. W badaniach w podwyższonej temperaturze używane są dwie pary elektrycznych elementów grzejnych. Osiągnięcie jednorodnej temperatury wewnątrz komory zapewnia wentylator napędzany silnikiem elektrycznym. Próbkę jest ekranowana przed bezpośrednim promieniowaniem cieplnym.

W celu przemieszczania i stabilnego ustawienia komory środowiskowej MTS 651 na stanowisku badawczym zaprojektowano i wykonano stelaż nośny. Stelaż ten składa się z dwóch zasadniczych elementów: sztywnej ramy przetrzennej oraz wózka mającego możliwość przemieszczania się względem ramy – widoczne na Rys. 4. Zasadniczymi elementami konstrukcyjnymi obu części są profile o przekroju prostokątnym ze stali S235JR. Przesunięcie się konstrukcji może odbywać się dzięki kółkom jezdnym z hamulcem, natomiast stabilizację konstrukcji podczas badań, gdy wózek z komorą jest wysunięty, zapewniają śruby z podstawką o regulowanej wysokości.

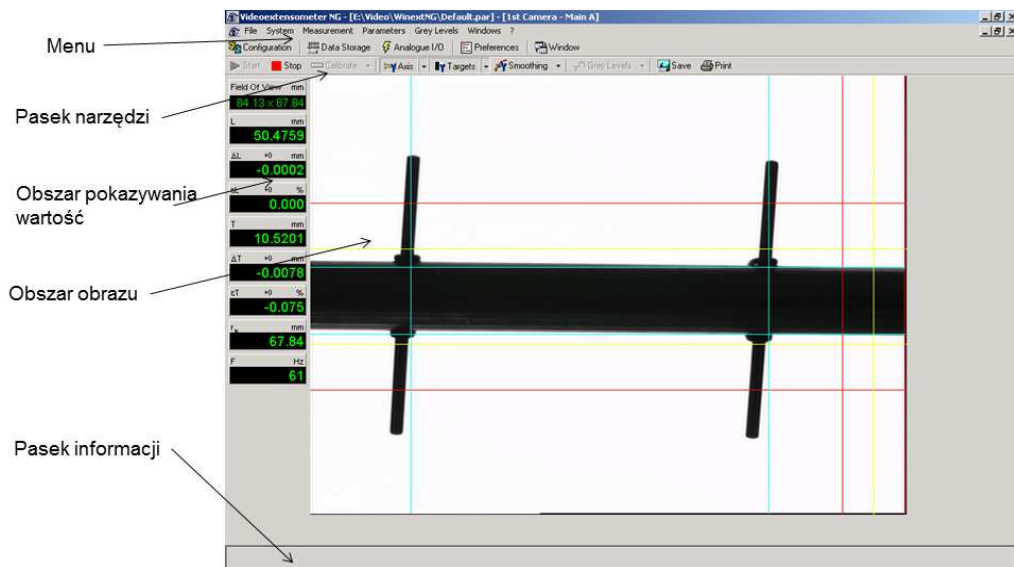


Rys. 3. Konfiguracja uchwytów oraz przekrój poprzeczny uchwytu z opisem zasady jego działania

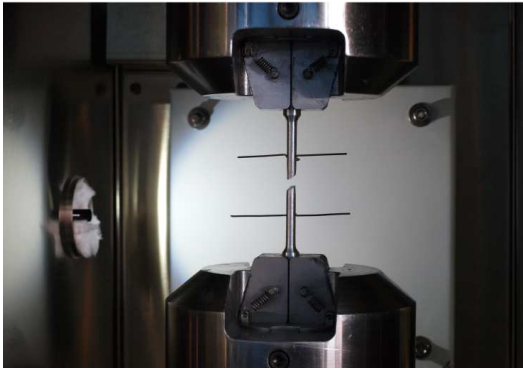


Rys. 4. Stelaż nośny komory środowiskowej

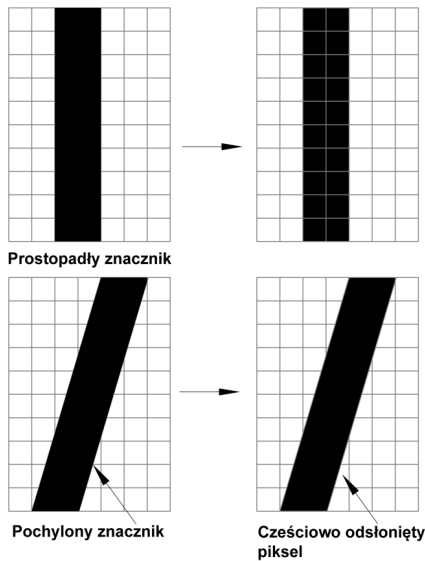
Do wyznaczania przemieszczenia odcinka pomiarowego został użyty wideoekstensometr ME 46 firmy MESSPHYSIK, którego okno pomiarowe widoczne jest na Rys. 5. Wideoekstensometr ten umożliwia bezdotkowy pomiar przemieszczenia bazy pomiarowej oraz śledzenie wyników pomiarów „on-line” na ekranie komputera. Może być on używany w szerokim zakresie pomiarowym – umożliwia swobodny wybór długości bazy pomiarowej. W badaniach przedstawionych w niniejszej pracy wykorzystano pomiarową o długości 20 mm (Rys. 6). W prezentowanym stanowisku wideoekstensometr jest używany do pomiaru przemieszczeń próbki w komorze środowiskowej (w podwyższonej temperaturze), poprzez szkło okienka komory. Kontrast obrazu zapewnia dioda o mocy 3W oświetlająca, poprzez światłowód, ekran rozpraszający znajdujący się wewnątrz komory, który został pokryty białą, matową farbą. Natomiast ustawienie światła w obiektywie regulowane jest poprzez przesłonę obiektywu kamery wideoekstensometru.



Rys. 5. Okno pomiarowe wideoekstensometru (Videoekstensometr NG 2009)



Rys. 6. Próbkę ze znacznikami długości pomiarowej wewnątrz komory środowiskowej (po zerwaniu w podwyższonej temperaturze)



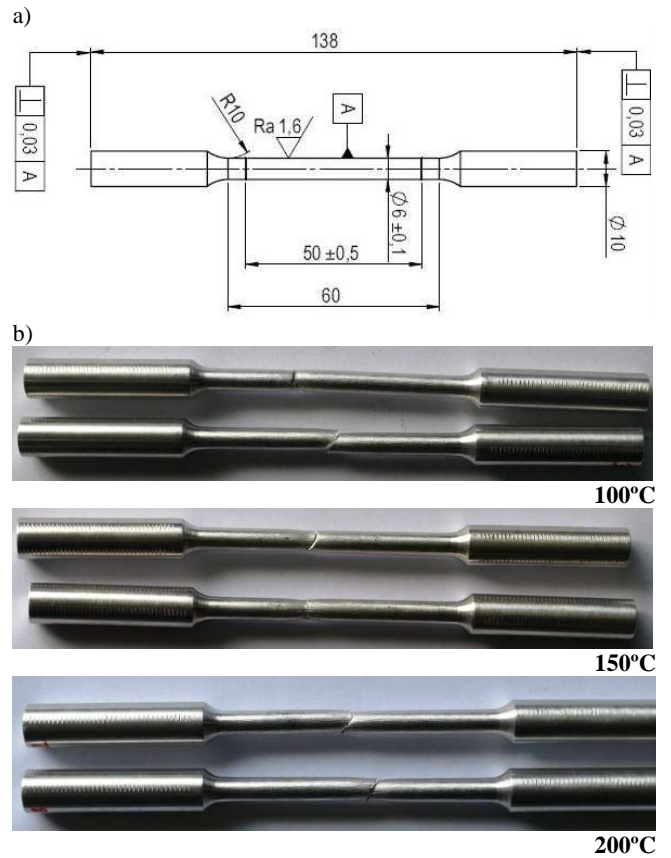
Rys. 7. Mapa pikseli, prostopadłe i nachylone znaczniki (Videоекstensometr NG)

Pomiar za pomocą wideoekstensometru możliwy jest dzięki znacznikom umieszczonym na badanej próbce, które powinny być nachylone pod kątem 2 – 5 stopni w stosunku do osi poprzecznej próbki (zaleca się kąt 2 – 3 stopni). Pochylenie znaczników na mapie pikseli powoduje przecięcia sąsiednich pikseli z czarnymi znacznikami, nachylonymi pod odpowiednim kątem, umieszczonymi na białym tle (Rys. 7). Tym samym śledzenie wydłużenia jest możliwe dzięki rozpoznaniu barw kontrastowych pikseli przez wideoekstensometr.

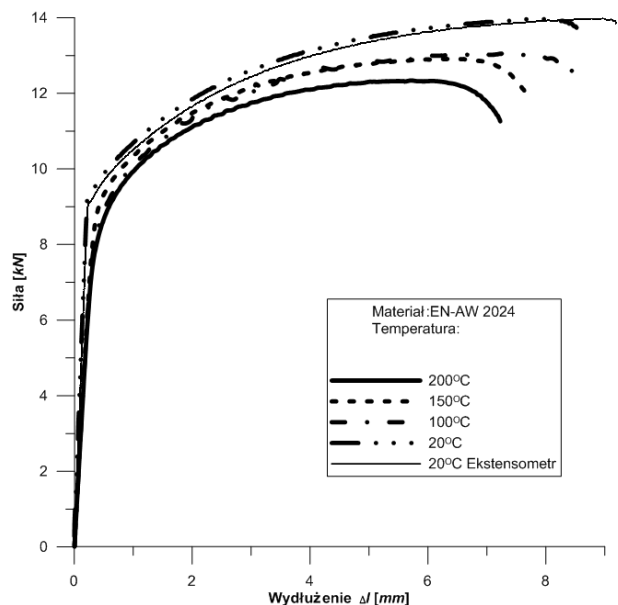
3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

W badaniach wykorzystano osiowosymetryczne, gładkie próbki, zgodne z PN-EN 10002-5, o średnicy pomiarowej 6 mm. Dla każdej wartości temperatury (równej 20°C, 100°C, 150°C i 200°C) przeprowadzono trzy próby. Badania zostały przeprowadzone na maszynie MTS MiniBionix 858, w komorze środowiskowej MTS 651 oraz z wykorzystaniem wideoekstensometru do pomiaru odkształcenia próbki. Podwyższoną temperaturę zadawano za pomocą komory środowiskowej, w której próbki były podgrzewane i wytrzymywane 10 minut przed badaniem, a następnie

zostały poddane monotonicznemu rozciąganiu ze stałą prędkością wydłużenia bazy pomiarowej równą 0.01 mm/s. Wyniki siły rozciągającej i przemieszczenia bazy pomiarowej, dla różnej zadanej temperatury, przedstawiono na Rys. 9 oraz w Tab. 1, a widok próbek po zerwaniu – na Rys. 8.



Rys. 8. Próbkę ze stopu EN-AW 2024: a) schemat i wymiary, b) próbki po zerwaniu w temperaturze 100°C, 150°C i 200°C



Rys. 9. Wykres zależności siły od wydłużenia bazy pomiarowej dla stopów aluminium EN-AW 2024 w podwyższonej temperaturze (pomiar wydłużenia za pomocą wideoekstensometru i ekstensometru)

Tab. 1. Zależność wydłużeń i siły od temperatury

Temperatura	Maks. siła F[kN]	Maks. przewężenie Δd [mm]	Maks wydłużenie Δl [mm]
20°C	14,269	0,001	9,458
100°C	13,228	0,725	7,305
150°C	12,914	0,734	6,518
200°C	12,526	1,530	6,401

Należy zwrócić uwagę, że dla temperatury 100°C i 150°C siła potrzebna do zerwania próbki wynosiła ok. 13 kN, a dla temperatury 200°C obniżyła się o prawie o 1 kN. Natomiast wydłużenie bazy pomiarowej jest największe dla temperatury 20°C, a najmniejszą wartość wydłużenia otrzymano dla temperatury 200°C. Taka sama zależność występuje dla przewężenia tj. największe i najmniejsze przewężenie występuje odpowiednio dla temperatury 200°C i 20°C. Należy dodać, iż dokonano weryfikacji pomiaru wydłużenia bazy pomiarowej za pomocą wideoekstensometru, powtarzając pomiar z wykorzystaniem ekstensometru Epsilon - 3542.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszej pracy stanowisko do badań właściwości mechanicznych stopów aluminium w podwyższonych temperaturach umożliwia przeprowadzanie testów jednoosiowego rozciągania i ściskania (a także dwuosiowego rozciągania – ściskania i skręcania). Rodzaj zadawanych obciążeń nie musi ograniczać się do obciążeń monotonicznych – możliwe jest prowadzenie badań w warunkach obciążeń zmiennych, ale w tym przypadku sterowanie odbywa się za pomocą zadawanej siły (lub momentu skręcającego), a nie odkształceniem bazy pomiarowej.

Potwierdzenie wyżej wymienionych możliwości wymaga, oczywiście, przeprowadzenia dodatkowych badań weryfikujących.

LITERATURA

1. **Abedrabbo N., Pourboghra F., Carsley J.** (2006), Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models. *International Journal of Plasticity*, 23, 841–875.
2. **Barbaux Y., Pons G.** (1993), New rapidly solidified aluminium alloys for elevated temperature applications on aerospace structures, *Journal de Physique III*, 3,191-196.
3. **Haaren, L., Boogaard van den A. H., Huetink J.** (2004), Modelling of aluminium sheet material at elevated temperatures, *7th ESAFORM Conference on Material Forming*, April 2004, Trondheim, Norway.
4. **Katalog uszczelnień „Simirit”** (2000).
5. **Kaufman J. G.** (2008), *Parametric Analyses of High Temperature Data for Aluminum Alloys*, ASM, Materials Park, Ohio.
6. **Long Z., Ningileri S., Kaufman J. G.,** (2007), *Application of Time-Temperature-Stress Parameters to High Temperature Performance of Aluminum Alloys*, The Minerals, Metals & Materials Society.

7. **Li D., Ghosh A.** (2002), Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, *Materials Science and Engineering*, A352, 279-286.
8. **Meena A.** (2010), *Tensile Test of Aluminium at High Temperature*, Department of Mechanical Engineering N.I.T. Rourkela Orissa.
9. **PN-EN 10002-5:2002**, *Próba rozciągania, Metoda badań w podwyższonej temperaturze*, PKN.
10. **Toros S., Ozturk F., Kacar I. S.** (2008), Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 1–12.
11. **Videoekstensometr NG** (2009) by Messphysik Materials Testing, A-8280 Fürstenfeld

WORKSTAND FOR RESEARCH OF ALUMINIUM ALLOYS MECHANICAL PROPERTIES IN ELEVATED TEMPERATURES

Abstract: In the following work, a workstand for research of materials mechanical properties in elevated temperatures is presented, consisting of duration machine MTS 858 MiniBionix together with original (designed and manufactured) particular hydraulic shafts. Environmental chamber MTS 651 was also adapted. Videoextensometer ME 46 manufactured by MESSPHYSIK was used to determine the translocation of the measurement section. The ME 46 videoextensometer allows for contactless translocation measurement and tracking of “on-line” measurements on computer screen. This may be used in wide range of research, allowing for choice of measurement base. Series of research involving monotonic stretching of aluminum EN-AW 2024 samples in temperature of 20°C, 150°C, 150°C and 200°C was also undertaken in order to determine resilient-plastic properties of the material, particularly the strengthening curve. Research was also undertaken in order to check and compare operation of videoextensometer and traditional axial extensometer.

Pracę wykonano w ramach grantu N N501 12 05 36 zrealizowanego w Politechnice Białostockiej, finansowanego w latach 2009 – 2012 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.