



Robert Uścińowicz

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

Corresponding author. E-mail: urobert@pb.edu.pl

Otrzymano (Received) 27.01.2008

ANALIZA PROCESU PEŁZANIA METALOWEGO KOMPOZYTU DWUWARSTWOWEGO Al-Zn

Przedstawiono analizę procesu odkształceń zachodzących podczas pełzania bimetalicznego kompozytu warstwowego aluminium-cynk w warunkach jednoosiowego stanu naprężeń i stałej temperatury. Kompozyt do testów uzyskano poprzez sklejenie pasów blach aluminiowych i cynkowych przy pomocy kleju do metalu CX-80 na bazie żywicy epoksydowej. Badania przeprowadzono również niezależnie na składnikach bimetalu oraz na próbkach, których warstwy nie połączono ze sobą trwale na długości pomiarowej. W opisie matematycznym procesów deformacji podczas monotonicznego obciążania i pełzania wykorzystano zmodyfikowany model ciała odkształcalnego - ortotropowego, szeroko stosowany dla kompozytu typu laminat - tzw. isostrain model. Przeprowadzone na wstępie testy doraźne ze stałą prędkością odkształcenia $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$ 1/s pozwoliły na wyznaczenie podstawowych wielkości mechanicznych, w tym granicznych wartości naprężeń, stałych sprężystości, parametrów równania Ramberga-Osgooda, opisującego charakterystyki rozciągania. Stwierdzono, że dla prób krótkotrwałych (doraźnych) realizowanych przy monotonicznym wzroście obciążenia prawo mieszanin prawidłowo opisuje właściwości mechaniczne metalowego kompozytu warstwowego w zakresie dużych odkształceń plastycznych. Badania pełzania prowadzono w zakresie stałych naprężeń 110÷121 MPa i w stałej temperaturze 273 K na identycznych próbkach, jakie były użyte w testach doraźnych. Krzywe pełzania otrzymane z testów rozciągania posłużyły do wyznaczenia zależności pomiędzy prędkościami odkształceń pełzania a naprężeniami dla wyodrębnionych dwóch stadiów procesu pełzania. Dla drugiego okresu pełzania wyznaczono, dla badanych rodzajów materiałów, równania funkcji opisujących zależność prędkości pełzania od naprężeń. W przypadku aluminium (Al) i kompozytu Al-Zn relacje pomiędzy $\dot{\epsilon}(t)$ i σ były liniowe lub quasi-liniowe. Zaproponowano empiryczne równanie pozwalające na wyznaczenie prędkości pełzania ustalonego kompozytu metalowego Al-Zn w zależności od reologicznych charakterystyk odkształceniowych jego składników dla różnych poziomów naprężeń. Poprawność otrzymanego równania zweryfikowano, wykorzystując dane otrzymane z eksperymentu. W ramach badań dokonano oceny stopnia podobieństwa badanych tworzyw do modelu ciała liniowo-lepkosprężystego. W przypadku kompozytu Al-Zn stwierdzono podobieństwo izochronicznych krzywych pełzania, a także ich nieliniowość. W trakcie testów rozciągania zaobserwowano efekt charakterystycznego wygięcia próbek w kierunku prostopadłym do płaszczyzny próbek (od strony warstwy aluminium). Jest to efekt wynikły ze znacznej różnicy wartości współczynników Poissona składników kompozytu w zakresie sprężystym ($\nu_{Zn} = 0,25$; $\nu_{Al} = 0,35$) i odpowiednio zróżnicowanych wartości współczynnika skurczu poprzecznego w zakresie odkształceń plastycznych.

Słowa kluczowe: metalowy kompozyt warstwowy, pełzanie, właściwości mechaniczne, umocnienie, krzywe izochroniczne

ANALYSIS OF CREEP PROCESS IN TWO-LAYER METALLIC Al-Zn COMPOSITE

Analysis of the deformation occurring during creep process of two-layer aluminium-zinc composite in conditions of fixed uniaxial stresses and the temperature was presented. The composite to tests made by gluing metal strips of aluminium and zinc with using of CX-80 glue based on epoxy resin. Tests were also independently carried out on components of bimetal, and on the specimens which layers did not permanently joined itself on the final gauge length. The mathematical description of deformation while monotonic loading and creep processes used an adapted model of deformational orthotropic body, widely applied for composites of the laminates type - so-called isostrain model. First tests carried out using monotonic increasing deformation rate $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$ 1/s gave possibility to determination basic mechanical properties, it means: values of stress limits and elongations, elastics constants, Ramberg-Osgood's parameters describing characteristics of tensile. It was found that for short-lived temporary tests realized at the monotonic increasing load the mixtures law correctly described mechanical properties in the range of great plastic strains of two-layer composite metal. The creep tests were carried out at the constant stress in the range of 110÷121 MPa and at the 273 K temperature at the identical samples which were used in initial tests. The creep curves received from tensile tests served for determination the dependence stationary creep rate on stress, for the tested material in the two separate stages of creep process. The formulas which described the relation among deformation creep rate and stresses for aluminium and Al-Zn composite during second period of creep were linear or quasi-linear form. Created empirical model of relation among creep strain rate and stress in the stationary creep period for Al-Zn composite contained rheological properties of components. Correctness of the worked out equation was verified using data held from experiment. During the study, the analysis of the similarity of tested materials to the model of the linear viscoelasticity body was executed. The reciprocal similarity of isochronous creep curves and non-linearity of form for Al-Zn composite was identified. In the tensile tests an effect of characteristic bending of specimen was observed in direction perpendicular to the plain of flat sample at the side of the aluminium layer. It could be explained by effect of the significant difference of the Poisson coefficients values of composite layers in the elastic range ($\nu_{Zn} = 0.25$; $\nu_{Al} = 0.35$) and suiting diversified values of contraction coefficient in the plastic range.

Keywords: clad metal, composite, creep, mechanical properties, hardening, isochronous curves

WPROWADZENIE

Bezpieczna eksploatacja niektórych konstrukcji wykonanych z metalowych kompozytów warstwowych nakłada obowiązek znajomości przebiegu zjawisk towarzyszących procesom odkształceniowym, których źródłem mogą być chwilowe przeciążenia, nagłe wahania temperatury, zmiany rodzaju obciążenia itp. Większość informacji o właściwościach mechanicznych materiałów kompozytowych musi być znana już na etapie projektowania. Bardzo ważny jest czynnik upływającego czasu, istotnie wpływający na bezpieczeństwo i ekonomikę eksploatacji konstrukcji. Potrzebna jest zatem określona wiedza o własnościach reologicznych zastosowanego kompozytu, mając na względzie wykorzystanie do jego tworzenia składniki. Jest to niezbędne, aby uchronić konstrukcję przed przyspieszonym zużyciem, a w konsekwencji zniszczeniem, co ma miejsce w trzecim niestabilnym stadium pełzania.

Niejednorodność strukturalna metalowego kompozytu warstwowego sprawia, że każda z jego warstw, w zależności od poziomu odkształceń, będzie przechodziła zarówno przy stałym, jak i zmiennym obciążeniu przez jakościowo odmienne stany fizyczne. Właściwości mechaniczne oraz wielkość strefy pośredniej, powstałej na drodze procesu spajania adhezyjnego, pozostają w ścisłym związku ze zdolnościami odkształceniowymi kompozytu warstwowego i powinny być uwzględniane, jeżeli jest to konieczne, w równaniach fizycznych opisujących izotermiczne procesy pełzania.

Większość prac dotyczących doświadczalnego opisu procesu odkształceń metalowych kompozytów warstwowych jest poświęcona badaniom krótkotrwałym, związanych z próbami rozciągania w temperaturze pokojowej. Eksperymentalna analiza naprężeń w bimetalu powstałym na bazie aluminium i stali przy monotonicznie rosnącym obciążeniu jest przedmiotem zainteresowań Shi-Hoona i innych (1997) [1]. W swojej pracy analizują oni również ewolucję krzywizny próbki badawczej w trakcie doraźnego odkształcania. Wyniki z eksperymentu są poparte symulacjami numerycznymi z pomocą MES w odniesieniu do dwu- i trójwarstwowych ośrodków.

W pracy podjęto także próbę opisu ewolucji anizotropii odkształceniowej w warstwach na kierunku poprzecznym do osiowego obciążenia, bazując na warunkach plastyczności Hilla i Hosforda. Podobną analizę, w odniesieniu do kryteriów plastyczności, dla metalowego kompozytu trójwarstwowego, przeprowadzili w swojej pracy Dong Nyung Lee i Yoon Kun Kim [2]. W innej pracy [3] tych samych autorów wyznaczono doświadczalnie zależność naprężeń granicznych od parametrów uogólnionych dla krzywych umocnienia warstw składowych kompozytu w trakcie plastycznego odkształcania. Wyznaczono między innymi współczynnik czułości kompozytu na zmianę prędkości odkształcania.

Większość autorów prac poświęconych analizie właściwości mechanicznych bimetalu powołuje się na prawo mieszanin, szeroko stosowane w mechanice kompozytów. W pracach [2-4] wykazano jego przydatność przy wyznaczaniu modułów Younga i granic plastyczności dla kompozytów zawierających warstwy składowe o podobnych właściwościach fizycznych. W swojej pracy Sherman [4] do określenia odkształcalności kompozytu metalowo-ceramicznego wykorzystał jako test trójpunktowe zginanie.

Zagadnienie zniszczenia przy pełzaniu, a także ocena własności reologicznych kompozytów w aspekcie własności jego składników są opisane w pracy Binera [5], gdzie analizowano między innymi wpływ naprężenia na prędkość pełzania ustalonego dla kompozytu wykonanego z komponentów o dużej różnicy wartości modułów Younga oraz granic sprężystości i plastyczności. Problem całościowego opisu procesu odkształceń pełzania, w tym zniszczenia, zawarto w pracy Naumenki i Altenbacha [6]. Zastosowali oni model Kachanova-Robotnova w odniesieniu do laminatu metalowego o periodycznej zmienności właściwości sprężysto-plastycznych warstw.

Na podstawie przeglądu dostępnej literatury dotyczącej badań eksperymentalnych procesów doraźnych i długotrwałych, w różnych stanach naprężeń, zachodzących w metalowych kompozytach warstwowych, można stwierdzić, że występuje znaczny niedobór informacji w tym względzie. Zwłaszcza niedostatecznie opisane są zjawiska zachodzące w warstwach kompozytu w procesie pełzania.

Celem pracy jest analiza procesu odkształceń pełzania w metalowym kompozycie warstwowym w warunkach jednoosiowego stanu naprężeń, w tym zbadanie relacji, jakie zachodzą pomiędzy prędkością pełzania ustalonego a naprężeniem w warunkach procesu izotermicznego. Dodatkowo zakłada się potrzebę opracowania, na podstawie eksperymentu, formuł matematycznych pozwalających na prognozowanie właściwości kompozytu na podstawie charakterystyk odkształceniowych jego składników (warstw).

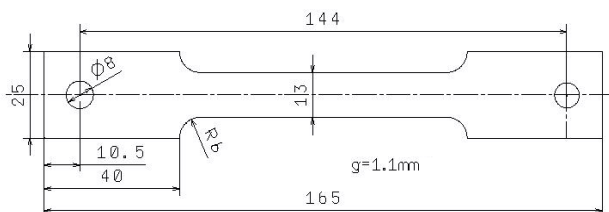
MATERIAŁY, PRÓBK I ORAZ PROCEDURY BADAWCZE

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano następujące cztery rodzaje próbek płaskich:

- próbki z blachy cynkowej o grubości 0,53 mm i gatunku Z1 wg PN-EN 1179; skład chemiczny (%): Zn - 99,708; Al - 0,002; Cu - 0,193; Ti - 0,09,
- próbki z blachy aluminiowej o grubości 0,5 mm i gatunku A1 wg EN AW-1050A: skład (%) Al - 99,58; Si - 0,12; Fe - 0,24; Cu - 0,003; Mg - 0,004; To - 0,03,

- próbki z blachy warstwowej Al-Zn o grubości 1,1 mm, w których warstwy aluminium i cynku sklejono ze sobą trwale klejem na całej długości próbki,
- próbki w formie pakietu Al-Zn, którego warstwy aluminiowa i cynkowa nie zostały połączone trwale na długości pomiarowej, a jedynie w części chwytowej. Łączna grubość próbki była sumą grubości warstw składowych (0,5 mm + 0,53 mm).

Geometrię próbki bimetalicznej pokazano na rysunku 1. Próbki wykonano z pasów o wymiarach 165 mm x 25 mm, które wycięto z płaszczyzn blach w kierunku zgodnym z kierunkiem ich walcowania. Połączenie blach składowych w kompozyt uzyskano poprzez spinę adhezyjną o grubości $g = 0,07$ mm za pomocą kleju do metalu CX-80 na bazie żywicy epoksydowej. Objętościowy (procentowy) udział poszczególnych warstw metali w kompozycie wynosił: Zn - 51,8% i Al - 48,2%.



Rys. 1. Geometria kompozytowej próbki badawczej Al-Zn
Fig. 1. The geometry of the Al-Zn composite specimen

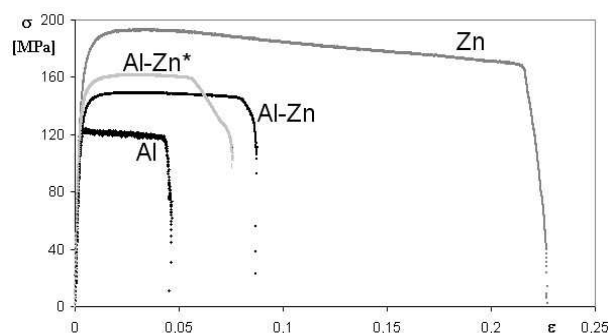
W celu wyznaczenia podstawowych właściwości mechanicznych przeprowadzono testy jednoosiowego, monotonicznie rosnącego rozciągania na próbkach płaskich wg norm [7, 8]. Pomiar odkształceń odbywał się na długości pomiarowej 50 mm. Nominalna szerokość próbek wynosiła 13 mm i stanowiła bazę do pomiaru odkształceń poprzecznych. Prędkość przyrostu odkształceń na bazie pomiarowej wynosiła $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$ 1/s. Wszystkie testy przeprowadzono w stałej temperaturze 293 K na maszynie uniwersalnej MTS Mini Bionix 858 z bezpośrednim pomiarem odkształceń wzdłużnych i poprzecznych.

Próby pełzania w warunkach stałego, osiowego naprężenia rozciągającego przeprowadzono na tej samej maszynie i w identycznych warunkach temperaturowych co testy doraźne. Temperatura badań testowanych materiałów przewyższała temperaturę homologiczną $t_H = 0,3$, tj. temperaturę inicjującą proces pełzania. Testy przeprowadzono dwuetapowo. Początkowo obciążano próbki monotonicznie ze stałą prędkością przyrostu odkształcenia do zadanej wartości naprężenia. Dalej następował etap kontrolowanego utrzymywania stałego naprężenia w przekroju próbki w czasie trzech godzin. Realizował to układ obciążeniowy maszyny, który sprzęgnięto z przetwornikami rejestrującymi zmiany wymiarów poprzecznych próbki. Zakres naprężeń zastosowanych w badaniach pełzania (dla wszystkich rodzajów próbek) obejmował wartości z przedziału

110÷121 MPa i był poniżej granicy plastyczności najslabszego składnika kompozytu - aluminium. Przyjęcie takiego zakresu naprężeniowego (poniżej granic plastyczności aluminium, cynku i kompozytu Al-Zn) pozwoliło na wywołanie, w każdej z badanych próbek, głównie odkształceń pełzania, tj. bez dodatkowych deformacji, będących udziałem procesu plastycznego płynięcia.

WYNIKI TESTÓW DORAŻNYCH

Doraźne testy rozciągania (rys. 2) przeprowadzone dla czterech rodzajów materiałów dały istotne informacje o ich sprężysto-plastycznych właściwościach podczas quasi-statycznego obciążania.



Rys. 2. Doświadczalne krzywe rozciągania dla czterech rodzajów materiałów

Fig. 2. Experimental creep curves for four kinds of materials

Wyniki testów doraźnych (z uwzględnieniem sposobu połączenia warstw) przedstawiono w tabeli 1. Zamieszczono w niej uśrednione wartości naprężeń granicznych $R_{0,05}$, $R_{0,1}$, $R_{0,2}$, odpowiadające trwałym odkształceniom 0,05%, 0,1% i 0,2%, a także wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m , moduły Younga E oraz parametry równania Ramberga-Osgooda (1), opisującego charakterystykę rozciągania w zakresie odkształceń równomiernych [9]

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{C_{RO}} \right)^{m_{RO}} \quad (1)$$

gdzie: ϵ , σ - odpowiednio: odkształcenie i naprężenie, C_{RO} , m_{RO} - parametry równania.

W oparciu o prawo mieszanin oraz zakładając jednakową odkształcalność metalicznych warstw kompozytu poddanych osiowemu rozciąganiu, można sformułować dla naprężeń granicznych $R_{0,05}$, $R_{0,1}$, $R_{0,2}$ oraz R_m i E poniższe zależności:

$$\begin{aligned} R_x^{Al-Zn} &= f_{Zn} R_x^{Zn} + f_{Al} R_x^{Al} \\ R_m^{Al-Zn} &= f_{Zn} R_m^{Zn} + f_{Al} R_m^{Al} \\ E_x^{Al-Zn} &= f_{Zn} E_x^{Zn} + f_{Al} E_x^{Al} \end{aligned} \quad (2)$$

$(x = 0,05\%, 0,1\%, 0,2\%)$

gdzie: $R_x^{Al-Zn}, R_x^{Zn}, R_x^{Al}$ - naprężenia graniczne dla kompozytu Al-Zn, cynku i aluminium, $E_x^{Al-Zn}, E_x^{Zn}, E_x^{Al}$ - moduły Younga, f_{Zn}, F_{Al} - objętościowe (procentowe) udziały składników w bimetalu. Formuły (2) uwzględniają w swej strukturze właściwości przynależne składnikom bimetalu. Niektóre wartości wyznaczone na ich podstawie ujęto w ostatniej kolumnie tabeli i oznaczono Al-Zn mix. Należy podkreślić, że wartości naprężeń $R_{0,1}, R_{0,2}, R_m$ wyznaczone doświadczalnie dla pakietu Al-Zn* i w oparciu formuły (2) są prawie identyczne. Z drugiej strony kompozyt Al-Zn i pakiet Al-Zn* wykazują w przypadku naprężeń $R_{0,1}, R_{0,2}, R_m$ odpowiednio względne różnice: 2,7, 5,1 i 6,7%, a dla modułu E różnica ta wynosi aż 35,5% (tab. 1).

TABELA 1. Wyniki testów doraźnych badanych materiałów
TABLE 1. The results of temporary tests of studied materials

Właściwości mechaniczne		Rodzaj materiału (próbki)				
		Al	Zn	Al-Zn	Al-Zn*	Al-Zn mix
$R_{0,05}$	MPa	111,8	123,7	113,6	112,5	118,0
$R_{0,1}$	MPa	118,2	140,0	126,4	129,8	129,5
$R_{0,2}$	MPa	123,7	162,3	136,4	143,3	143,7
R_m	MPa	125,8	195,1	151,4	161,6	161,7
E	GPa	51,5	63,0	53,1	72,0	57,4
C_{RO}	MPa	180,3	478,2	294,5	334,6	287,8
m_{RO}	-	16,0	5,7	7,9	10,7	9,1

Al-Zn* - warstwy Al i Zn nie sklejono na długości pomiarowej, a jedynie w części chwytowej próbki; Al-Zn mix wartości wyznaczone z prawa mieszanin.

Cynk charakteryzuje się znaczną ciągliwością w stosunku do aluminium, a zastosowanie w kompozycie tego drugiego zmniejszyło zdolność do wydłużania się kompozytu Al-Zn (także pakietu Al-Zn*) ponad 2-krotnie. Dla kompozytu i pakietu Al-Zn* wartości $R_{0,05}$ są zbliżone i wykazują różnicę ok. 4% w stosunku do wartości wyznaczonych z prawa mieszanin.

WYNIKI I ANALIZA TESTÓW PEŁZANIA

Testy pełzania dla każdej próbki przeprowadzono w warunkach stałego naprężenia (z zakresu 110÷121 MPa) i stałej temperatury. Posłużyły one do sporządzenia wykresów w układzie czas-odkształcenie względne. Na charakterystykach, które uzyskano dla cynku, aluminium i kompozytu Al-Zn, wyodrębniono trzy stadia procesu, przy czym do dalszej analizy wzięto pod uwagę jedynie dwa pierwsze z nich. Krzywe pełzania opisano równaniami w postaci:

- I i III stadium pełzania

$$\epsilon_I = A + B \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^C \quad (3)$$

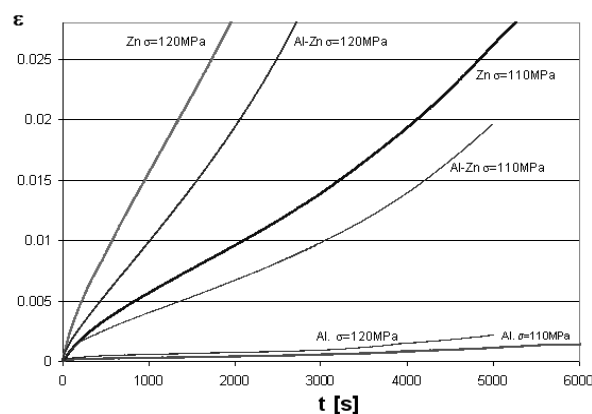
- II stadium pełzania (ustalonego)

$$\epsilon_{II} = a + b \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (4)$$

gdzie: t - czas bieżący, $t_0 = 1$ s - czas jednostkowy, A, B, C, a, b - współczynniki równań.

Przykładowe krzywe pełzania otrzymane dla Al, Zn i kompozytu Al-Zn dla naprężenia $\sigma = 110$ MPa i $\sigma = 120$ MPa przedstawiono na rysunku 3.

Różniczkując względem czasu równania (3) i (4), otrzymano funkcje opisujące prędkości pełzania $\dot{\epsilon} = f(t)$.



Rys. 3. Krzywe pełzania uzyskane dla badanych materiałów przy naprężeniach $\sigma = 110$ MPa i $\sigma = 120$ MPa

Fig. 3. The creep curves for tested materials under $\sigma = 110$ MPa and $\sigma = 120$ MPa stress

Szczegółowej analizie poddano zakres pełzania ustalonego ($\dot{\epsilon} = \text{const}$) - jako najbardziej interesujący z inżynierskiego punktu widzenia. W następnej kolejności sporządzono wykresy przedstawiające zależność prędkości pełzania ustalonego od naprężenia, co pozwoliło na ocenę stopnia intensywności zachodzących deformacji przy wzrastającym poziomie naprężenia w materiale. Otrzymane zależności zilustrowano na rysunku 4, a równania funkcji opisujących zbiory punktów doświadczalnych zamieszczono poniżej:

- Aluminium (Al): $\dot{\epsilon}(t) = p_1 + q_1 \cdot \sigma$ (5)

- Cynk (Zn): $\dot{\epsilon}(t) = p_2 + q_2 \cdot \sigma^{-1}$ (6)

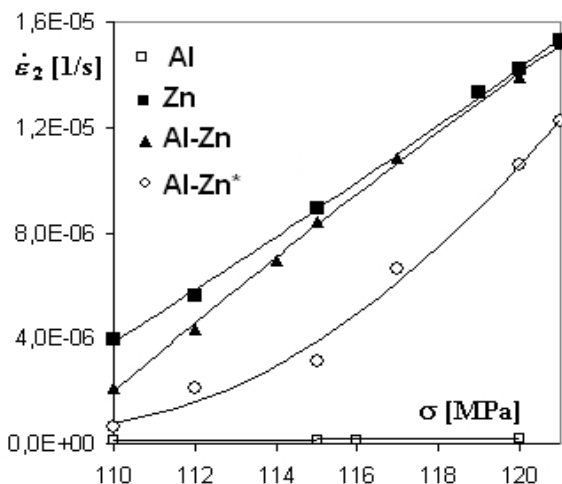
- Kompozyt (Al-Zn): $\dot{\epsilon}(t) = p_3 + q_3 \cdot \sigma^{-1}$ (7)

- Pakiet Al-Zn*: $\dot{\epsilon}(t) = p_4 \exp\left(\frac{-\sigma}{p_4}\right)$ (8)

gdzie: p_i - współczynniki występujące w równaniach (5)-(8), σ - naprężenie, $\dot{\epsilon}(t)$ - prędkość pełzania ustalonego.

Doświadczalnie wartości współczynników p_i i q_i wyznaczone dla badanych materiałów zestawiono w tabeli 2.

Dla cynku (Zn) i pakietu Al-Zn* zależności pomiędzy prędkością pełzania ustalonego a naprężeniem mają charakter nieliniowy (wykładniczy). W przypadku aluminium (Al) i kompozytu Al-Zn relacje pomiędzy $\dot{\epsilon}(t)$ i σ są prawie liniowe.



Rys. 4. Relacje pomiędzy naprężeniem a prędkością pełzania ustalonego dla badanych materiałów

Fig. 4. Relationships between stress and stationary creep rate for the tested materials

TABELA 2. Wartości współczynników p_i i q_i
TABLE 2. The values of p_i and q_i coefficients

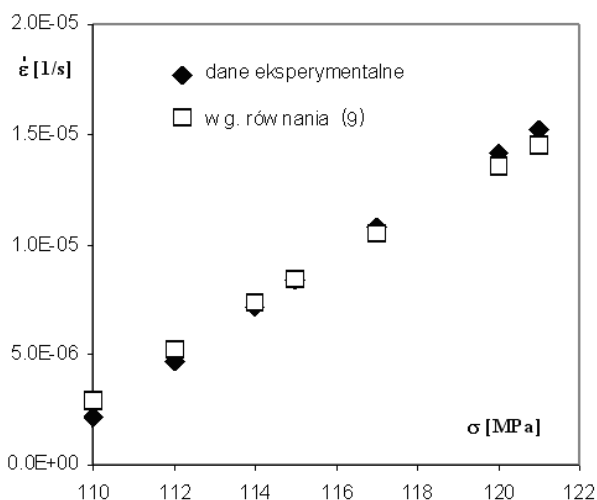
Rodzaj materiału	Współczynniki	
	p_i	q_i
Al	$-8,50 \cdot 10^{-7}$	$-8,70 \cdot 10^{-9}$
	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$-1,40 \cdot 10^{-2}$
Zn	$-1,47 \cdot 10^{-4}$	$-1,59 \cdot 10^{-2}$
	$-1,760 \cdot 10^{-16}$	$-4,84$

Na podstawie danych doświadczalnych zbudowano dla kompozytu Al-Zn empiryczny model - funkcję (9), opisującą zależność prędkości odkształceń w postaci

$$\dot{\epsilon}(t) = (q_1 + q_2)\sigma^{-1} + (p_1 + p_2) \quad (9)$$

gdzie: $p_i (i = 1,2)$ - stałe materiałowe występujące we wzorach (5) i (6). Weryfikację poprawności tego opisu, uwzględniając dane uzyskane z eksperymentu, przedstawiono na rysunku 5.

Zaproponowane empiryczne równanie (9) dla kompozytu Al-Zn wyjątkowo dobrze opisuje wyniki doświadczalne w środkowym zakresie przedziału badanych naprężeń 110÷121 MPa.

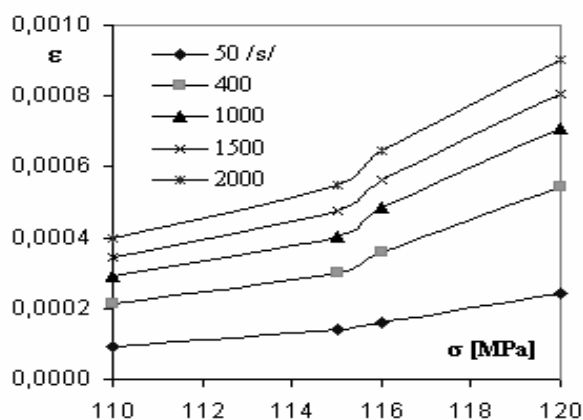


Rys. 5. Doświadczalna weryfikacja poprawności opisu zależności prędkości pełzania od naprężeń dla kompozytu Al-Zn

Fig. 5. The experimental verification of the correctness creep rate - stress relation for the Al-Zn composite

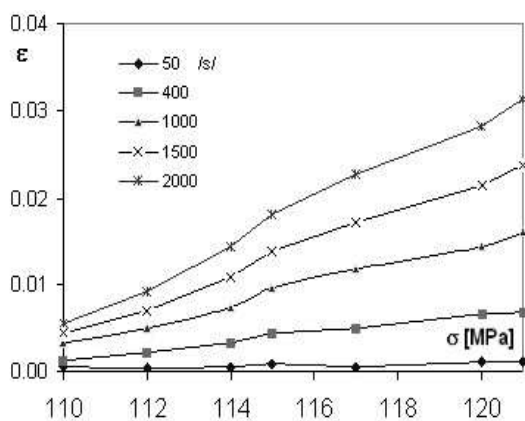
W celu oceny stopnia podobieństwa badanych tworzyw do modelu ciała liniowo-lepkosprężystego wykreślono izochroniczne krzywe pełzania, które to z definicji [10] są liniami w przestrzeni naprężeń obrazującymi jednakowy czas uzyskania przez materiał określonego poziomu odkształceń. W przypadku aluminium (rys. 6) i kompozytu Al-Zn (rys. 7) kształt izochronicznych krzywych pełzania jest daleki od modelu ciała liniowo-lepkosprężystego. Jedynie dla cynku (rys. 8) występuje liniowa zależność naprężeń i odkształceń w pierwszym i drugim stadium pełzania.

Wszystkie krzywe izochroniczne badanych materiałów (dla wybranych sekwencji czasu) wykazują wzajemne podobieństwo, stąd każda z nich może być tworzona poprzez mnożenie współrzędnych krzywej wyjściowej przez odpowiedni współczynnik będący funkcją czasu.



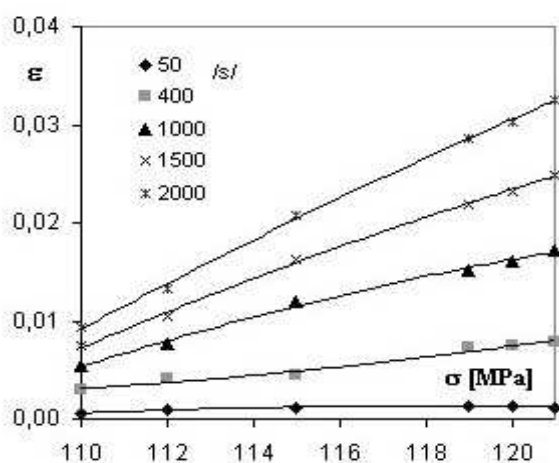
Rys. 6. Izochroniczne krzywe pełzania aluminium w pierwszym i drugim stadium pełzania

Fig. 6. Isochronous creep curves for the aluminium in the first and second stage of the creep



Rys. 7. Izochroniczne krzywe pełzania kompozytu Al-Zn w I i II stadium pełzania

Fig. 7. Isochronous creep curves for the Al-Zn composite in the first and second stage of the creep



Rys. 8. Izochroniczne krzywe pełzania cynku w I i II stadium pełzania

Fig. 8. Isochronous creep curves for the zinc in the first and second stage of the creep

Wykorzystując założenie o jednakowych odkształceniach zachodzących w warstwach kompozytu metalowego Al-Zn podczas jednoosiowego rozciągania ($\epsilon_{Al-Zn} = \epsilon_{Zn} = \epsilon_{Al}$ - „iso-strain model”) oraz brak naprężeń w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny próbki ($\sigma_{3Al} = \sigma_{3Zn} = 0$), można stwierdzić, że w kierunku wzdłużnym naprężenie będzie się wyrażało następującym równaniem:

$$\sigma_{1Al-Zn} = \sigma_{1Al} f_{Al} + \sigma_{1Zn} f_{Zn} \quad (10)$$

Spełniony musi być przy tym warunek wynikający z braku naprężeń na kierunku nieobciążonym, poprzecznym do kierunku rozciągania:

$$\sigma_{1Al-Zn} = 0 = \sigma_{2Al} f_{Al} + \sigma_{2Zn} f_{Zn} \quad (11)$$

gdzie: $\sigma_{2Al-Zn}, \sigma_{2Al}, \sigma_{2Zn}$ - odpowiednio naprężenia dla kompozytu, aluminium i cynku na kierunku poprzecznym do obciążenia (w płaszczyźnie próbki),

$\sigma_{1Al-Zn}, \sigma_{1Al}, \sigma_{1Zn}$ - odpowiednie naprężenia w kierunku rozciągania, f_{Al}, f_{Zn} - objętościowe udziały składników w kompozycie.

Na postawie powyższego stanu naprężenia na kierunku poprzecznym do obciążenia implikuje powstanie zarówno w zakresie sprężystym, jak i plastycznym naprężeń ściskających w aluminium i rozciągających w warstwie cynku. Wywołuje to efekt charakterystycznego wygięcia próbki w kierunku prostopadłym do płaszczyzny próbki kompozytowej. Zaobserwowane zjawisko można tłumaczyć znaczną różnicą wartości współczynnika Poissona składników kompozytu Al-Zn w zakresie sprężystym ($\nu_{Zn} = 0,25; \nu_{Al} = 0,35$) i odpowiednio różnymi wartościami współczynnika skurczu poprzecznego w zakresie odkształceń trwałych. Szczególnie jest to wyraziste w przypadku, gdy kompozyt jest wykonany z grubszych warstw o skrajnie różnych właściwościach mechanicznych.

WNIOSKI

- Dla prób krótkotrwałych (doraźnych) realizowanych przy monotonicznym wzroście obciążenia prawo mieszanin prawidłowo opisuje właściwości mechaniczne w zakresie dużych odkształceń plastycznych metalowego kompozytu warstwowego.
- Proces pełzania kompozytu Al-Zn, w zakresie badanych naprężeń, charakteryzuje niewielka nieliniowość zależności prędkości odkształceń od naprężeń.
- Badany kompozyt Al-Zn odbiega od modelu ciała liniowo-lepkosprężystego, co jest skutkiem zastosowania w jego budowie warstwy aluminium.
- Zaproponowane, empiryczne równanie (9) pozwala na wyznaczenie prędkości pełzania ustalonego kompozytu metalowego Al-Zn w zależności od reologicznych charakterystyk odkształceniowych jego składników dla różnych poziomów naprężeń.

Podziękowania

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr S/WM/2/08 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

- [1] Shi-Hoon, Keun-Hwan Kim, Kyu Hwan, Dong Nyung Lee, Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet, *Materials Science&Engineering* 1997, A222, 158-165.
- [2] Dong Nyung Lee, Yoon Keun Kim, Tensile properties of stainless steel-clad aluminum sandwich sheet metals, *Journal of Materials Science* 1988, 23, 4, 1436-1442.
- [3] Dong Nyung Lee, Yoon Keun Kim, On the rule of mixtures for flow stress in stainless-steel-clad aluminum sandwich sheet metals, *Journal of Materials Science* 1988, 23, 4, 558-564.

-
- [4] Sherman D., The mechanical behavior of layered brazed metal/ceramic composite, *Materials Letters* 1998, 33, 255-260.
- [5] Biner S.B., Creep deformation and rupture behavior of a laminated metal matrix composite, *Journal of Materials Science* 2002, 37, 3555-3558.
- [6] Naumenko K., Altenbach H., A phenomenological model for anisotropic creep in a multipass weld metal, *Arch., Appl. Mech.* 2005, 74, 808-819.
- [7] ASTM EM-04 Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International 2004, 1-57.
- [8] PN-EN 10002-1. Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia 2004.
- [9] Ramberg W., Osgood W.T., Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note 902. Washington: National Advisory Committee of Aeronautics 1943, 1-29.
- [10] Malinin N.N., Rżysko J., *Mechanika materiałów*, PWN, Warszawa 1981.