

Autoreferat

dr inż. Robert Roman Uścińowicz

**Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,**

Białystok, 15 marca 2016

1. Imię i nazwisko

Robert Roman Uścińowicz

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Magister inżynier	Politechnika Białostocka, Instytut Mechaniki, studia magisterskie na kierunku Mechanika i budowa maszyn, specjalność: Technologia maszyn, czerwiec 1984r.
Doktor nauk technicznych	Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, temat rozprawy doktorskiej: pt.: „ <i>Wpływ stanu naprężeń na proces pełzania anizotropowego stali ferrytycznej</i> ”, czerwiec 1995r. promotor: prof. dr hab. inż. Anatoliusz Jakowluk. Recenzenci: prof. dr hab. inż. Marcin Chrzanowski, prof. dr hab. inż. Józef Wojnarowski.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

10.1984–10.1985	Asystent stażysta, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.
06.1986–09.1988	Asystent, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.
10.1988–10.1994	Starszy asystent, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.
10.1994–10.1995	Wykładowca, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.
10.1995–10.2012	Adiunkt, Katedra Mechaniki Stosowanej (później Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej), Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.
od 10.2012 do chwili obecnej	Starszy wykładowca, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.).

Monografia pt. „Procesy odkształcania metalowych kompozytów warstwowych”, wydana przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Białostockiej w 2015 r. (załącznik 8), jest syntetycznym podsumowaniem przeprowadzonych badań naukowych dotyczących procesów odkształcania kompozytów, które w swojej strukturze zawierały dwie połączone trwale warstwy różnych metali. Monografia ta stanowi mój samodzielny, twórczy dorobek naukowy, osiągnięty po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych.

Metale i stopy metali, pomimo ekspansji tworzyw sztucznych, nadal zajmują czołowe miejsce w grupie materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych we współczesnej technice. Wraz z postępowaniem technologicznym wzrasta jednak zapotrzebowanie na nowe, wyspecjalizowane materiały konstrukcyjne o unikatowych właściwościach fizykochemicznych. Wobec wyczerpywania się dostępnych dla przemysłu złóż rzadkich metali oraz wzrastających kosztów ich pozyskania i przetworzenia, poszukuje się nowych niedrogich rozwiązań, które sprostałyby dzisiejszemu i przyszłemu zapotrzebowaniu. Pewną i stosunkowo niedrogą technologią jest wytwarzanie materiałów warstwowych na bazie istniejących metali poprzez ich trwałe zespolenie. Sprzyja temu rozwój zaawansowanych technik łączenia metali.

Metalowe kompozyty warstwowe (MKW) są produkowane na skalę przemysłową już od ponad pięćdziesięciu lat. Większość opublikowanych do dnia dzisiejszego prac naukowych m.in. Sematina i Piehlera [1], [2], Sawickiego i Dyi [3], [4], Dyi i in. [5], [6], Kima i Yu [7], Yoshidy i Hino [8] skupia się głównie na technologicznych aspektach ich produkcji, w tym na problemach związanych z ich plastycznym kształtowaniem. Mało jest jednak eksperymentalnie poświadczonych danych o zjawiskach i procesach zachodzących podczas ich odkształcania zarówno w warunkach prostego, jak i złożonego stanu naprężenia. Jest to niezwykle ważny problem z punktu widzenia projektowania i eksploatacji konstrukcji wykonanych z tych materiałów. Do nielicznych publikacji, w których analizuje się z punktu widzenia mechaniki procesy związane z odkształceniem sprężysto-plastycznym występującym podczas obciążania metalowych kompozytów warstwowych, można zaliczyć prace Lee i Kim [9], [10], Semiatina i Piehlera [11], Choi i in. [12], czy Lamika i in. [13].

Celem naukowym, który realizowano podczas badań doświadczalnych, była kompleksowa ocena zjawisk fizycznych zachodzących w metalowych kompozytach dwuwarstwowych podczas procesów ich odkształcania w warunkach prostego i złożonego stanu naprężenia. Działania te zmierzały do uzyskania na drodze eksperymentu niezbędnych danych, które ułatwiłyby opracowanie spójnej metodyki projektowania wytrzymałościowego elementów konstrukcji wykonanych z metalowych kompozytów warstwowych, a także pozwoliłyby właściwie dobrać parametry technologiczne w procesie plastycznego kształtowania.

Badania dotyczące metalowych kompozytów warstwowych realizowano w kilku kierunkach, których efekty w sferze poznawczej przedstawiono w skróconym zakresie poniżej.

A. Właściwości mechaniczne kompozytu Al/Zn przy różnych sposobach obciążania

Powszechnie wiadomo, że sposób i warunki przeprowadzania obciążania próbek metalicznych wpływają na wartości właściwości mechanicznych uzyskiwane podczas realizacji testów wytrzymałościowych. Zbadano wpływ sposobu i prędkości monotonicznego rozciągania na właściwości mechaniczne metalowego kompozytu warstwowego i jego warstwy składowe. Okazało się, że w przypadku metalowego kompozytu warstwowego aluminium-cynk (Al/Zn), obciążanego osiową siłą rozciągającą, równoległą do uwarstwienia, wartości granic sprężystości $R_{0,05}$, plastyczności $R_{0,2}$ i wytrzymałości doraźnej R_m były silnie zależne od sposobu zadawania obciążenia (trybu sterowania maszyną wytrzymałościową), nawet dla małej prędkości naprężenia ($\dot{\sigma} = 0,6 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$) i odkształcenia ($\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$). Krzywe rozciągania uzyskane z testów dla kompozytu Al/Zn miały odmienny przebieg w całym zakresie wartości odkształcenia sprężysto-plastycznego, tj. były silnie zależne od sposobu realizacji quasi-statycznego rozciągania. Występowało także znaczne zróżnicowanie wartości modułu Younga i energii właściwej (objętościowej) równomiernego odkształcenia sprężystego i plastycznego.

Proces umocnienia zachodzący w metalowym kompozycie warstwowym Al/Zn i jego warstwach składowych przy monotonicznym obciążaniu z różnymi prędkościami naprężenia $\dot{\sigma}$ i odkształcenia $\dot{\epsilon}$ poprawnie opisywało trójparametryczne równanie

Swifta [14]. Przydatność jego w opisie krzywych umocnienia bimetali potwierdza m. in. praca Parsy i in. [15]. Analiza wartości parametrów tego równania pozwoliła wnioskować, że umocnienie przy prędkości $\dot{\sigma} = 0,6 \text{ MPa/s}$ przebiegało z dużo większą intensywnością niż przy $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/s}$. Wraz ze wzrostem prędkości naprężenia $\dot{\sigma}$ w zakresie $0,6 \div 18 \text{ MPa/s}$ wartości współczynnika umocnienia kompozytu Al/Zn malały. Zmniejszała się również wartość energii właściwej niezbędnej do odkształcenia równomiernego próbek badawczych. Wzrost prędkości $\dot{\sigma}$ powodował, że wartości parametrów naprężeniowych $R_{0,05}$, $R_{0,2}$ i R_m wyznaczanych dla kompozytu Al/Zn rosły, a w zakresie prędkości naprężenia $0,6 \div 6,0 \text{ MPa/s}$ przebiegało to szczególnie intensywnie. Biorąc pod uwagę rodzaj i stan fizyczny warstw składowych metalowego kompozytu warstwowego Al/Zn wykazano, że poprzez odpowiedni dobór metali na warstwy można zmniejszyć jego czułość na zmianę prędkości obciążania.

Testy wytrzymałościowe zrealizowane dla kompozytu Al/Zn wykazały, że dla parametrów naprężeniowych $R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m , a także modułu Younga prawo mieszanin, wyrażone historyczną regułą Voigta [16], pozwalało dość precyzyjnie oszacować ich wartości na podstawie wartości analogicznych parametrów i modułów wyznaczonych doświadczalnie dla jego komponentów. Potwierdzono to zarówno dla kompozytów metalicznych, których warstwy sklejo no ze sobą za pomocą kleju adhezyjnego, jak i dla kompozytów, których warstwy połączono poprzez duże odkształcenie plastyczne. O możliwościach zastosowania tego prawa do określania właściwości mechanicznych różnych rodzajów kompozytów piszą Taya i Arsenault w pracy [17]. Badania eksperymentalne zrealizowane przez Yoshidę i Hino [12] oraz Lee i Kim [10] również dokumentują ten fakt.

W przypadku plastycznego kształtowania elementów konstrukcji wykonanych z metalowych kompozytów warstwowych niezbędna jest także wiedza o ich zdolnościach odkształceniowych. Jednym z parametrów, który jest pomocny przy planowaniu obróbki plastycznej, jest maksymalne odkształcenie równomierne ϵ_u . Znajomość wartości tego odkształcenia zapewnia powodzenie operacji technologicznych i uzyskanie produktu wysokiej jakości. W badaniach własnych rozważono dwie koncepcje obliczania na drodze analitycznej wartości maksymalnego odkształcenia równomiernego ϵ_u . Stwierdzono, że zastosowanie warunku maksymalnego obciążenia

daje możliwość poprawnego prognozowania wartości ε_u , co potwierdzono eksperymentalnie. Do podobnych wniosków doszli Semiatin i Piehler [11], którzy przeprowadzali testy rozciągania próbek z trójwarstwowego kompozytu metalowego (struktura typu sandwich), składającego się z kombinacji warstw stali nierdzewnej 304 i stopu aluminium 1100.

B. Pełzanie krótkotrwałe metalowego kompozytu warstwowego Al/Zn

Proces rozwoju odkształcenia podczas pełzania metalowego kompozytu dwuwarstwowego jest słabo poznany, szczególnie w odniesieniu do kompozytów o strukturze złożonej z warstw metali połączonych spoiwem adhezyjnym. Badania zrealizowano na płaskich próbkach dwuwarstwowym aluminium-cynk (Al/Zn), dwukrotnie cieńszych niż opisane powyżej w punkcie A. Testy obejmowały zarówno badania wstępne, które miały ocenić podstawowe właściwości fizyczne metali i spoiwa oraz monitorować i opisać rozwój małych odkształceń sprężysto-plastycznych w początkowym etapie rozciągania. Do opisu wykorzystano zależność Ramberga-Osgooda.

W ramach testów zasadniczych przeprowadzono próby pełzania krótkotrwałego kompozytu Al/Zn oraz niezależnie testy jego komponentów. Nadrzędnym celem tych badań było znalezienie zależności pomiędzy naprężeniem a minimalną prędkością pełzania cynku, aluminium (składników Al/Zn) oraz kompozytu Al/Zn, a także zbadanie wpływu warstwy klejowej na proces rozwoju odkształcenia. Metale składowe kompozytu Al/Zn charakteryzowały się niską temperaturą topnienia, stąd też możliwe było przeprowadzenie testów pełzania w temperaturze pokojowej przy dość wysokim poziomie naprężenia.

Analiza wyników uzyskanych z quasi-statycznych, monotonicznych testów jednoosiowego rozciągania kompozytu Al/Zn wykazała, że prawo mieszanin (reguła Voigta) nieznacznie przeszacowywało wartości takich parametrów jak: granica sprężystości $R_{0,05}$, plastyczności $R_{0,2}$, wytrzymałość doraźna R_m oraz moduł Younga. Większą zgodność wartości wyżej wymienionych parametrów z wartościami doświadczalnymi uzyskano, stosując to prawo w przypadku próbek Al/Zn pak., w których warstwy cynku i aluminium nie były połączone trwale w części pomiarowej próbki, a jedynie w jej części chwytowej, mocowanej w uchwytach maszyny

wytrzymałościowej. Podczas testów monotonicznego rozciągania i pełzania kompozytu Al/Zn zaobserwowano zjawisko wyginania (wykrzywiania się) próbek, tj. odkształcanie się ich w kierunku prostopadłym do uwarstwienia, co wynikało z odmiennego stanu naprężenia w poszczególnych warstwach składowych oraz różnic ich właściwości mechanicznych.

Stwierdzono, że w procesie pełzania kompozytu Al/Zn w zakresie badanych wartości naprężenia, występowała nieznaczna nieliniowość zależności między minimalną prędkością pełzania a naprężeniem. Wyznaczone izochroniczne krzywe pełzania sugerowały odstępstwo badanego kompozytu od cech modelu ciała liniowo lepko-sprężystego. Analiza wyników testów pozwoliła również na sformułowanie prostego empirycznego równania, które bazując na parametrach reologicznych warstw składowych kompozytu metalowego, pozwala wyznaczać dla niego prędkość pełzania ustalonego.

C. Wpływ kierunku walcowania na proces pełzania blachy bimetalicznej Al/Cu

W energetyce i elektronice bardzo często wykorzystuje się metalowe kompozyty warstwowe w postaci elementów aluminiowo-miedzianych (Al/Cu). Niejednokrotnie w wyniku przepływu prądu elektrycznego o dużej gęstości przez takie elementy, a także w rezultacie oddziaływań zewnętrznych następuje ich rozgrzewanie, co przy dodatkowym obciążeniu mechanicznym skutkuje rozwojem procesów reologicznych. Badanie wpływu krótko- i długotrwałego oddziaływania termicznego na obciążone elementy konstrukcji wykonane z bimetalu Al/Cu jest niezbędne dla zapewnienia ich bezpiecznej pracy.

Przeprowadzone badania bimetalu Al/Cu i jego komponentów (aluminium i miedzi) obejmowały zarówno testy wstępne, podczas których wyznaczono podstawowe właściwości mechaniczne, a także testy pełzania. W testach wstępnych wykorzystano quasi-statyczną próbę rozciągania, którą zrealizowano w temperaturze 293 K, wykorzystując płaskie próbki wycięte z płaszczyzny blachy w trzech kierunkach $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Testy wykazały dużą anizotropię właściwości mechanicznych bimetalu, a także jego komponentów w odniesieniu do parametrów naprężeniowych $R_{0,05}, R_{0,2}, R_m$ oraz modułu Younga. Było to skutkiem procesu walcowania podczas odkształceniowego łączenia ze sobą metali. Także proces umocnienia metali składowych

w próbkach bimetalicznych wyciętych z blachy w różnych kierunkach względem kierunku walcowania przebiegał z różną intensywnością. Wspomniane wcześniej prawo mieszania w przypadku badanego bimetalu prawidłowo prognozowało właściwości mechaniczne kompozytu w odniesieniu do wyznaczonych parametrów naprężeniowych $R_{0,05}, R_{0,2}, R_m$.

Badania pełzania realizowano, obciążając próbki płaskie w temperaturze 523 K stałą siłą osiową w zakresie wartości naprężenia $86 \div 138 \text{ MPa}$. Próbki płaskie wycięto z płaszczyzny blachy Al/Cu w orientacji zgodnej z kierunkiem walcowania (RD) oraz w kierunku prostopadłym (TD) do niej. Stwierdzono, że w procesie pełzania bimetalu Al/Cu relacje pomiędzy minimalną prędkością odkształcenia a naprężeniem opisywała funkcja eksponencjalna zarówno dla próbek wyciętych z arkusza zgodnie z kierunkiem walcowania (RD), jak dla próbek z kierunku poprzecznego (TD). Dla wyższych wartości naprężenia (powyżej 120 MPa) wartości minimalnej prędkości odkształcenia próbek z kierunku RD były większe niż z kierunku TD, a dla niższych niż 120 MPa relacje były przeciwne. Z kolei zależność pomiędzy naprężeniem a czasem do zniszczenia najlepiej charakteryzowała funkcja wykładnicza. Kierunek wycięcia próbki z arkusza blachy bimetalicznej miał wpływ na przebieg procesu pełzania i jednocześnie na wartości odkształcenia całkowitego przy zniszczeniu oraz czas trwania poszczególnych stadiów procesu. Dla próbek bimetalicznych Al/Cu wyciętych zgodnie z kierunkiem wzdłużnym (RD) wartości odkształcenia przy zniszczeniu rosły wykładniczo wraz ze wzrostem wartości naprężenia. W przypadku próbek z kierunku poprzecznego (TD) wartości tego odkształcenia były prawie niezależne od wartości naprężenia.

Poczynione obserwacje w stosunku do badanego procesu pełzania pozwoliły na stwierdzenie, że minimalna prędkość pełzania bimetalu Al/Cu dla próbek z kierunku RD i TD dobrze koreluje z czasem do zniszczenia, spełniając równanie Monkmana-Granta [18], a także z czasem do zniszczenia podzielonym przez odkształcenie przy zniszczeniu, co wyraża równanie Dobesa-Milicki [19]. Wartości współczynników z powyższych równań były różne dla próbek bimetalicznych z kierunku RD i TD. Wyznaczono też dla bimetalu Al/Cu wartości parametru tolerancji (wrażliwości) na uszkodzenia przy pełzaniu, który zdefiniowali Leckie i Hayhurst [20]. Wynosiły one dla kierunków RD i TD odpowiednio 2,03 i 1,72, co wskazywało, że zniszczenie w obu tych przypadkach miało cechy mechanizmu międzykrystalicznej nukleacji pustek.

D. Wpływ temperatury na wytrzymałość złącza bimetalicznego Al/Cu

Nieprzewidziana zmiana warunków pracy złącza bimetalicznego Al/Cu wywołana na przykład wzrostem temperatury może niekorzystnie wpływać na jego właściwości mechaniczne, nawet po jej obniżeniu. Zbadanie skutków krótkotrwałego oddziaływania termicznego na strefę kontaktu warstw metalicznych w złączu Al/Cu jest ważne ze względu na jego eksploatację.

Przeprowadzone w temperaturze 293 K testy wytrzymałości na ścinanie pojedynczego złącza zakładkowego Al/Cu miały wyjaśnić, jakie skutki wywołuje przegrzanie takiego złącza. Metodyka badań obejmowała zarówno mikroanalizę składu chemicznego na granicy rozdziału faz aluminium-miedź, jak i identyfikację mechanizmów zniszczenia złącza. Wyniki badań wykazały, że zmiany strukturalne, zachodzące w metalowym kompozycie warstwowym Al/Cu pod wpływem temperatury i będące wynikiem nawet krótkotrwałego (40 ÷ 150 min) oddziaływania ciepła, mogą być zagrożeniem dla jego prawidłowej pracy i stwarzać ryzyko przedwczesnego zniszczenia. Krótkotrwały wzrost temperatury złącza w zakresie temperatur od 523 K do 773 K może zmniejszyć jego wytrzymałość na ścinanie nawet trzykrotnie. Przyczyn zjawiska można upatrywać w zmianach strukturalnych, tj. powstawaniu strefy dyfuzyjnej na granicy rozdziału faz, która zmieniała zasadniczo właściwości mechaniczne złącza oraz obniżała jego zdolność do przenoszenia obciążenia.

Podczas testów wytrzymałościowych zaobserwowano mechanizm zniszczenia złącza zarówno typu ciągłego (kohezyjnego), kruchego (adhezyjnego), jak i mieszanego. Testy ścinania pojedynczego złącza zakładkowego Al/Cu wykazały, że zniszczenie odbywało się wskutek dekohezji warstwy aluminiowej zarówno w przypadku próbek niewygrzewanych, jak i wygrzewanych w temperaturze 523 K przez 40 min. Testy ścinania przeprowadzone na próbkach wygrzewanych w temperaturze 523 K dłużej niż 40 min oraz w zakresie wyższych temperatur (623 ÷ 773 K) wykazywały zniszczenie typu adhezyjnego. W tych warunkach grubość strefy dyfuzyjnej w złączu bimetalicznym rosła wykładniczo wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania. Zwiększaniu czasu wygrzewania z 90 min do 150 min w temperaturze 723 K, a także w temperaturach wyższych towarzyszył znaczny wzrost prędkości przyrostu grubości strefy dyfuzyjnej, osiągający maksymalną wartość 0,21 $\mu\text{m}/\text{min}$.

E. Badania powierzchni plastyczności metalowych kompozytów warstwowych

Materiały anizotropowe charakteryzują się bardziej złożonym procesem odkształcania przy przechodzeniu ze stanu sprężystego w plastyczny niż materiały izotropowe. W przypadku rozciągania metalowego kompozytu warstwowego, który zazwyczaj zawiera w swej strukturze co najmniej dwie warstwy metali, przejście ze stanu sprężystego w plastyczny przebiega niejednocześnie w jego poszczególnych warstwach, co wynika z różnicy ich właściwości mechanicznych oraz odmiennego stanu naprężenia. Przeprowadzone badania powierzchni plastyczności metalowego kompozytu warstwowego umożliwiły poznanie rzeczywistych relacji między naprężeniem a odkształceniem plastycznym w materiale znajdującym się w złożonym stanie naprężenia. Pozwoliły one także na identyfikację anizotropii odkształceniowej, dając sposobność prześledzenia historii rozwoju odkształcenia. Do wyznaczenia powierzchni plastyczności dla dwóch różnych metalowych kompozytów warstwowych zastosowano dwie odmienne metody badawcze. Testowane kompozyty różniły się nie tylko rodzajem warstw metalicznych, ale i geometrią próbek oraz sposobem połączenia metali. W eksperymentach wykorzystano blachę bimetaliczną aluminium-miedź otrzymaną przez walcowanie na gorąco oraz rurki osiowosymetryczne ze stopu aluminium Pa38 i miedzi M2R połączone ze sobą spoiną adhezyjną.

W przypadku blachy bimetalicznej Al/Cu badania realizowano w dwóch etapach, z których pierwszy obejmował testy wstępne. Celem ich było wyznaczenie właściwości mechanicznych bimetalu Al/Cu i jego warstw składowych. Zrealizowano je dla próbek wyciętych z płaszczyzny blachy w siedmiu kierunkach określonych kątem β względem kierunku jej walcowania. Drugi etap to badania zasadnicze, w których wykorzystano metodę Szczepińskiego [21] do identyfikacji powierzchni plastyczności bimetalu Al/Cu.

Badania wstępne przeprowadzone na standaryzowanych próbkach z aluminium, miedzi oraz bimetalu Al/Cu wykazały, że proces walcowania blach spowodował powstanie silnie ukierunkowanej struktury wewnętrznej, co przejawiało się znacznym zróżnicowaniem właściwości mechanicznych próbek wyciętych pod różnymi kątami β względem kierunku walcowania. Dla wszystkich badanych materiałów największe wartości parametrów naprężeniowych występowały na kierunku prostopadłym do kierunku ich walcowania. Zaobserwowano także skutki wtórnego walcowania, jakiemu

poddawane były blachy z miedzi i aluminium podczas ich łączenia w bimetale. Wykorzystane dla bimetalu Al/Cu prawo mieszanin do szacowania wartości jego parametrów naprężeniowych $R_{0,05}$, $R_{0,2}$ i R_m na badanych kierunkach β pozwoliło uzyskać wartości naprężenia zgodne z wartościami doświadczalnymi.

Zastosowana w badaniach zasadniczych metoda Szczepińskiego [21], wykorzystująca testy rozciągania przeprowadzane na minipróbkach wyciętych pod kątem $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ$ z predefiniowanej próbki wielkogabarytowej, umożliwiła wyznaczenie powierzchni plastyczności dla blachy bimetalicznej Al/Cu i jej składników. Ewoluuje przy wzroście poziomu odkształcenia trwałego powierzchnie plastyczności aluminium, miedzi i bimetalu Al/Cu wykazywały wzmocnienie izotropowe. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem odkształcenia trwałego, tj. dla $\varepsilon_i \geq 0,05\%$, linie odpowiadające eksperymentalnym powierzchniom plastyczności bimetalu Al/Cu i linie wygenerowane przy użyciu prawa mieszanin miały zbliżony kształtem przebieg i leżały w bliskim sąsiedztwie jedynie dla kierunków z zakresu $\alpha = 0^\circ \div 45^\circ$. Dla odkształcenia odpowiadającego granicy proporcjonalności ($\varepsilon_i = \varepsilon_H$) linie utworzone z pomocą prawa mieszanin znacznie odbiegały od swoich eksperymentalnych odpowiedników. Na poziomie odkształcenia odpowiadającego umownej granicy plastyczności ($\varepsilon = 0,2\%$) powierzchnia plastyczności bimetalu Al/Cu, uzyskana na podstawie danych eksperymentalnych, różniła się znacząco od powierzchni wyznaczonej na podstawie kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego. Jedynie zbliżone wartości naprężenia odnotowano dla kierunków określonych kątem $\alpha = 0^\circ$ i 90° . Analizie porównawczej przy odkształceniu trwałym $\varepsilon = 0,2\%$ poddano też powierzchnie plastyczności uzyskane dla aluminium, miedzi i bimetalu Al/Cu w tzw. „stanie dostawy” z powierzchniami wyznaczonymi dla tych metali po powtórnym ich zdeformowaniu, tj. po operacji walcowania w celu połączenia aluminium i miedzi.

Odmienną metodę badawczą zastosowano do wyznaczenia wycinków powierzchni plastyczności z wykorzystaniem cienkościennych próbek rurkowych wykonanych z metalowego kompozytu warstwowego Pa38/M2R, stopu aluminium Pa38 i miedzi M2R. Próbki obciążano różnymi kombinacjami siły osiowej i momentu skręcającego wywołując w materiałach płaski stan naprężenia. Badania traktowano jako rozpoznawcze. Ich celem była jedynie ocena kształtu wycinka powierzchni plastyczności

i obserwacja jego ewolucji przy wzrastającej wartości intensywności odkształcenia. Badania pozwoliły na ocenę poprawności zastosowanej metody i umożliwiły porównanie doświadczalnej powierzchni plastyczności kompozytu Pa38/M2R z powierzchnią wygenerowaną z pomocą związków analitycznych. Przy pomocy tej metody, tj. z użyciem wielu próbek eksperymenty były prowadzone m. in. przez Ivey'a [22], Miastkowskiego i Szczepińskiego [23] oraz Hu i in. [24].

Badania własne wykazały, że wszystkie testowane materiały, tj. stop aluminium Pa38, miedź M2R oraz kompozyt dwuwarstwowy Pa38/M2R, wykazały wzmocnienie izotropowe. Stwierdzono także podobieństwo kształtów kolejnych powierzchni plastyczności Pa38/M2R przy wzrastających wartościach intensywności odkształcenia. Zaproponowany dla kompozytu prosty związek, jako kryterium plastyczności, wzorowany na warunku Hubera-von Misesa-Hencky'ego i prawie mieszanin, dawał wyniki nieznacznie odbiegające od danych eksperymentalnych, pomimo braku uwzględnienia właściwości mechanicznych warstwy spajającej metale.

4.1. Monografia

R. Uścińowicz, „Procesy odkształcania metalowych kompozytów warstwowych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, s. 239, 2015 [25].

W monografii omówiono następujące zagadnienia związane z procesami odkształcania metalowych kompozytów warstwowych:

- Sklasyfikowano i opisano współcześnie stosowane metody otrzymywania metalowych kompozytów warstwowych (MKW). Wyróżniono trzy grupy metod: 1) odlewnicze – stosujące płynne metale podczas łączenia, 2) odkształceniowe – wykorzystujące duże odkształcenie plastyczne do tworzenia połączenia komponentów, 3) bezodkształceniowe obejmujące pozostałe sposoby łączenia metali.
- Przedstawiono najważniejsze techniczne zastosowania metalowych kompozytów warstwowych.
- Zbadano wpływ dwóch sposobów monotonicznego obciążania na właściwości mechaniczne metalowego kompozytu warstwowego. Zastosowano jednoosiowe monotoniczne rozciąganie ze stałą prędkości naprężenia (sterowanie sygnałem naprężenia) oraz ze stałą prędkością odkształcenia (sterowanie sygnałem

odkształcenia). Badania doświadczalne przeprowadzono również niezależnie na komponentach kompozytu. W pracy określono także dla tych materiałów relacje między prędkością naprężenia a podstawowymi parametrami mechanicznymi wyznaczanymi z quasi-statycznego testu rozciągania.

- Wyprowadzono dwie zależności pozwalające wyznaczać wartość maksymalnego odkształcenia równomiernego dla metalowego kompozytu warstwowego obciążanego osiową siłą rozciągającą równoległą do uwarstwienia, wykorzystując dane uzyskane z testów rozciągania składników kompozytu. Wyniki otrzymane za pośrednictwem tych zależności poddano weryfikacji doświadczalnej.
- Zbadano wpływ spoiwa adhezyjnego łączącego trwale warstwy metali na wartości parametrów mechanicznych wyznaczanych dla metalowych kompozytów warstwowych w testach wytrzymałościowych.
- Opisano przy pomocy zależności matematycznych proces pełzania metalowego kompozytu warstwowego aluminium-miedź oraz aluminium-cynk. Wyznaczono zależności pomiędzy naprężeniem a prędkością odkształcenia, czasem do zniszczenia i odkształceniem zniszczenia. Sprawdzone przydatność klasycznych równań pełzania do opisu procesu odkształcenia zachodzącego w metalowym kompozycie warstwowym w warunkach krótkotrwałego i długotrwałego oddziaływania obciążenia i temperatury.
- Sprawdzone przydatność prawa mieszanin (wg reguły Voigta) do wyznaczania parametrów określających właściwości mechaniczne metalowego kompozytu warstwowego na podstawie właściwości jego warstw składowych otrzymywanych podczas badanych procesów odkształceniowych.
- Zbadano wpływ kierunku walcowania blachy bimetalicznej na jej proces pełzania.
- W skali mikro i makro dokonano oceny wpływu temperatury i czasu wygrzewania na wytrzymałość na ścinanie pojedynczego bimetalicznego złącza zakładkowego. Zidentyfikowano mechanizmy zniszczenia występującego podczas ścinania złącza bimetalicznego, uwzględniając grubość strefy dyfuzyjnej powstałej na granicy rozdziału faz.
- Wykorzystując dwie eksperymentalne metody badawcze wyznaczono i monitorowano ewolucję powierzchni plastyczności metalowych kompozytów warstwowych i ich komponentów przy wzrastających wartościach odkształcenia trwałego.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1. Rozdziały w monografiach

- 1) R. Uścińowicz, „*Experimental verification of similarity of creep velocity curves*”, rozdział w *Low cycle fatigue and elasto-plastic behaviour of materials*, Eds. K. -T. Rie, P. D. Portella, Dordrecht: Springer Netherlands, , ss. 259–264, 1998.

Opisane w pracy badania eksperymentalne procesu pełzania stacjonarnego i niestacjonarnego przeprowadzono na próbkach z niskostopowej stali chromowo-molibdenowej 15HM w temperaturze podwyższonej 823 K i w warunkach złożonego stanu naprężenia. Podczas testów cienkościennie próbki rurkowe obciążano kombinacją siły osiowej, momentu skręcającego oraz ciśnienia pary wodnej dostarczonej do ich wnętrza. Wyznaczone charakterystyki zmienności składowych stanu odkształcenia posłużyły do wyznaczenia prędkości składowych odkształcenia dla dyskretnej wartości czasu znormalizowanego. Analizując wzajemne relacje między wartościami składowych prędkości odkształcenia dla kilkunastu wartości czasu unormowanego i przy różnych konfiguracjach wektora stanu naprężenia, wykazano podobieństwo krzywych prędkości pełzania zarówno dla dwuosiowych, jak i wieloosiowych stanów naprężenia. Zweryfikowano to doświadczalnie dla wybranych dyskretnej wartości czasu znormalizowanego i trzech stadiów procesu pełzania. Zaobserwowane geometryczne podobieństwo krzywych prędkości pełzania umożliwia wykorzystanie quasi-liniowej teorii pełzania anizotropowego [26] do opisu procesu pełzania metali.

- 2) R. Uścińowicz, „*The evolution of creep anisotropy in 15HM steel*”, in *Algorithmization of mathematical models for non-holonomic constraints system and nonlinear mechanics in the biaxial stress states of solid bodies*, Eds. by Anatoliusz Jakowluk, Svatoslav E. Karpovich, Publishers of Bialystok Technical University, ss. 163–173, 1998.

W pracy przedstawiono technikę badań pełzania stacjonarnego i niestacjonarnego stali 15HM w jednoosiowym i płaskim stanie naprężenia. Wyniki testów uzyskane z doświadczeń opisano przy pomocy quasi-liniowej teorii pełzania anizotropowego [26], wyznaczając wartości współczynników tensora anizotropii odkształceniowej towarzyszącej procesowi deformacji próbek. Analiza przebiegu krzywych zmienności współczynników anizotropii wykazała, że w pierwszym okresie pełzania występuje

największy bezwzględny przyrost ich wartości. Wraz z upływem czasu wartości współczynników anizotropii stabilizują się na prawie stałym poziomie (stadium pełzania ustalonego). W trzecim okresie pełzania wraz z upływającym czasem następuje ich ponowny wzrost tuż przed zniszczeniem próbki. Poprawność zastosowanego modelu matematycznego w opisie pełzania zweryfikowano doświadczalnie dla różnych prędkości odkształceń i stanów naprężenia. Do opisu wyników z przeprowadzonych eksperymentów w złożonym stanie naprężenia zastosowano kryterium wytrzymałości długotrwałej Sdobyreva [27], którego przydatność dla stali ferrytycznych wykazali m. in. Aplin i Eggeler [28], a także Lokoshchenko [29].

5.2. Publikacje w periodykach z listy JCR

- 1) R. Uścińowicz, „*Experimental identification of yield surface of Al-Cu bimetallic sheet*”, *Composites Part B: Engineering*, t. 55, ss. 96–108, 2013.

W pracy omówiono wyniki badań doświadczalnych zrealizowanych na metalowym kompozycie warstwowym w postaci blachy bimetalicznej Al/Cu uzyskanej przez walcowanie. Do wyznaczenia powierzchni plastyczności zastosowano metodę opisaną w pracy Szczepińskiego [21]. Polegała ona na monotonicznym rozciąganiu minipróbek, które wycięto z uprzednio predeformowanej próbki wielkogabarytowej. Minipróbki wycinano pod różnymi kątami względem kierunku wstępnego odkształcenia plastycznego. Podobny algorytm postępowania, wymagany przez wyżej wymienioną metodę, zastosowano do składników bimetalu, tj. miedzi i aluminium, dla których przeprowadzono niezależne testy. Zgromadzone dane doświadczalne umożliwiły zbudowanie wycinków powierzchni plastyczności, których ewolucja przy wzrastającym poziomie doksztalcenia trwałego była przedmiotem ilościowych i jakościowych analiz. Porównano kształt wyznaczonych eksperymentalnie powierzchni plastyczności z powierzchniami uzyskanymi za pomocą prawa mieszanin wg reguły Voigta [16] oraz kryterium Hubera-von Misesa. Analiza kształtu powierzchni plastyczności wykazała, że zarówno aluminium, miedź jak i utworzony na ich bazie bimetel Al/Cu umacniają się izotropowo. Zbadano również wpływ predeformacji plastycznej na kształt powierzchni plastyczności testowanych materiałów.

- 2) R. Uścińowicz, „*The effect of rolling direction on the creep process of Al-Cu bimetallic sheet*”, *Materials & Design*, t. 49, ss. 693–700, 2013.

Praca prezentuje wyniki badań doświadczalnych pełzania metalowego kompozytu warstwowego Al/Cu uzyskanego z połączenia blachy aluminiowej i miedzianej przez walcowanie. Na wstępie artykułu opisano wyniki uzyskane z jednoosiowych testów monotonicznego rozciągania w temperaturze 293 K, które umożliwiły określenie podstawowych właściwości mechanicznych bimetalu. Wszystkie testy były zrealizowane na próbkach płaskich, wyciętych z płaszczyzny blachy Al/Cu w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania (RD) i w kierunku prostopadłym do niego (TD). Testy pełzania przeprowadzono w temperaturze 523 K i w zakresie wartości naprężenia 88,5 MPa ÷ 137,9 MPa. Analiza wyników eksperymentów pozwoliła na wyznaczenie zależności pomiędzy minimalną prędkością pełzania ustalonego a zastosowanym naprężeniem dla próbek z kierunku RD i TD. Przedmiotem badań było zjawisko zniszczenia przy pełzaniu. Poszukiwano zależności pomiędzy prędkością pełzania ustalonego a czasem do zniszczenia i odkształceniem w momencie zniszczenia. Do opisu zagadnienia wykorzystano model Monkmana-Granta [18] i jego modyfikację. Zwrócono uwagę na fakt dużego oddziaływania procesu walcowania na przebieg monotonicznego rozciągania bimetalu Al/Cu w temperaturze 293 K, jak i pełzania w temperaturze 523 K.

- 3) R. Uścińowicz, „*Impact of temperature on shear strength of single lap Al-Cu bimetallic joint*”, *Composites Part B: Engineering*, t. 44, nr 1, ss. 344–356, 2013.

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących właściwości mechanicznych bimetalu aluminium–miedź w postaci blachy warstwowej otrzymanej w wyniku walcowania na gorąco. Opisano podstawowe właściwości mechaniczne tego materiału wyznaczone z testu quasi-statycznego rozciągania. Zidentyfikowano anizotropię jego właściwości mechanicznych oraz przeanalizowano przebieg procesu umocnienia. Testy mechaniczne oraz analizę otrzymanych za ich pośrednictwem parametrów przeprowadzono również dla komponentów bimetalu. Głównym celem prowadzonych badań była analiza wyników testów wytrzymałości na ścinanie pojedynczego bimetalicznego złącza zakładkowego Al/Cu podczas jego rozciągania. Przeanalizowano wpływ temperatury w zakresie 293-773 K i czasu wyżarzania na wartości maksymalnego naprężenia stycznego występującego przy ścinaniu międzymetalicznej warstwy przejściowej łączącej metale. Przeprowadzono

mikroanalizę składu chemicznego na granicy rozdziału faz i zmierzono grubość warstwy dyfuzyjnej wygenerowanej w różnych warunkach temperaturowych. Zbadano mechanizm zniszczenia złączy w zależności od sposobu i warunków oddziaływania ciepła. Ustalono, że wskutek zmian strukturalnych na granicy rozdziału faz metali powstawała intermetaliczna strefa, która była odpowiedzialna za wytrzymałość na ścianie bimetalu oraz znacząco wpływała na jego zdolności eksploatacyjne.

- 4) R. Uścińowicz, „Influence of loading rate on hardening process of Al-Zn metal layered composite”, *Materials & Design*, t. 32, nr 8–9, ss. 4316–4326, 2009.

W pracy analizowano wpływ sposobu i prędkości rozciągania metalowego kompozytu warstwowego Al/Zn na jego właściwości mechaniczne, a w szczególności na proces umocnienia. Przedstawiono wyniki testów zrealizowanych na próbkach płaskich wykonanych z cienkiego metalowego kompozytu warstwowego na bazie aluminium i cynku. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej poprzez rozciąganie próbek kompozytowych ze stałą prędkością odkształcenia $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} 1/s$ na bazie pomiarowej i prędkością naprężenia $\dot{\sigma} = 0,6 MPa/s$. Połączenie warstw kompozytu uzyskano poprzez sklejenie ze sobą pasów z aluminium i cynku za pomocą kleju do metalu CX-80 na bazie żywicy epoksydowej. Testy rozciągania przeprowadzono także na składnikach kompozytu, tj. aluminium i cynku, a także próbkach typu pakiet Al/Zn, którego warstw nie połączono ze sobą trwale na długości bazy pomiarowej, a jedynie w części chwytowej próbki. Zakładając jednakowe odkształcanie się każdej z warstw kompozytu wzdłuż kierunku obciążenia przeprowadzono ocenę parametrów naprężeniowych i odkształceniowych opisujących właściwości mechaniczne badanych materiałów. Stwierdzono, że zastosowanie określonego sposobu obciążania istotnie wpływa na kształt charakterystyk odkształceniowych kompozytu, w tym na proces jego umocnienia. Wartości parametrów naprężeniowych uzyskane z eksperymentów dla kompozytu Al/Zn porównano z analogicznymi wartościami obliczonymi za pomocą wzorów wyprowadzonych w oparciu o prawo mieszanin wg Voigta [16], które uwzględniały parametry mechaniczne przynależne składnikom kompozytu. Zaobserwowano, że dla prób krótkotrwałych (doraźnych) realizowanych przy monotonicznym wzroście obciążenia z prędkościami $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} 1/s$ i $\dot{\sigma} = 0,6 MPa/s$ prawo mieszanin prawidłowo prognozowało wartości wybranych parametrów

mechanicznych kompozytu.

- 5) R. Uścińowicz, „*Creep of a laminated aluminium-zinc composite*”, *Materials Science*, t. 44, nr 2, ss. 283–289, 2008.

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących procesu pełzania metalowego kompozytu dwuwarstwowego Al/Zn. Materiał został wytworzony poprzez sklejenie ze sobą pasów z blachy aluminiowej i cynkowej przy pomocy kleju do metalu. Przedmiotem analiz były wartości wielkości mechanicznych wyznaczone z doraźnych prób rozciągania i testów pełzania przeprowadzonych w identycznych warunkach temperaturowych. Próbkami badawczymi były płaskie z kompozytu Al/Zn były obciążane osiową siłą rozciągającą równoległą do uwarstwienia. Identyczne testy przeprowadzono niezależnie na składnikach kompozytu. Opracowano empiryczny model opisujący prędkość pełzania ustalonego kompozytu Al/Zn z uwzględnieniem reologicznych parametrów odkształceniowych jego składników. Dodatkowo zbadano stopień podobieństwa testowanego kompozytu (i jego komponentów) do modelu ciała liniowo-lepkosprężystego. W analizie badanych wielkości mechanicznych wykorzystano prawo mieszanin wg Voigta [16] i założenie o jednakowej odkształcalności każdej z warstw kompozytu podczas jednoosiowego rozciągania. W trakcie testów rozciągania próbek zaobserwowano efekt charakterystycznego wyginania próbek w kierunku prostopadłym do ich płaszczyzny. Był to skutek występowania m.in. różnicy wartości współczynnika Poissona oraz skurczu poprzecznego warstw składowych w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych.

- 6) R. Uścińowicz, „*Identification of yield surface segment of two-layer Pa38/M2R composite*”, *Mechanics of Composite Materials*.
Praca jest zatwierdzona do druku przez Editor-in-Chief.

Praca zawiera opis badań eksperymentalnych zrealizowanych na metalowym kompozycie warstwowym (Pa38/M2R) o strukturze warstwowej, złożonej ze stopu aluminium i miedzi. Testy przeprowadzono na cienkościennych próbkach rurkowych, zadając w nich płaski stan naprężenia poprzez różne kombinacje siły osiowej i momentu skręcającego. Warstwy metali w próbkach kompozytowych były połączone za pomocą spoiny adhezyjnej z użyciem kleju do metalu. Identyczne testy przeprowadzono niezależnie na próbkach rurkowych wykonanych z metali stanowiących składniki

kompozytu. Badania eksperymentalne miały dostarczyć danych do wizualizacji wycinków powierzchni plastyczności w kolejnych fazach wzrostu poziomu intensywności odkształcenia. Obserwacja powierzchni plastyczności kompozytu i jego składników pozwoliła na stwierdzenie, że wraz ze wzrostem wartości intensywności odkształcenia ε_i zachodzi podobieństwo kształtu kolejnych ewoluujących wycinków powierzchni plastyczności. Największy względny, procentowy przyrost składowych tensora naprężenia dla różnych stanów naprężenia występował w przypadku kompozytu Pa38/M2R w początkowym zakresie intensywności odkształcenia $\varepsilon_H - 0.05\%$. Otrzymane na podstawie danych z eksperymentu wycinki powierzchni plastyczności porównano z zarysami powierzchni, które wygenerowano dla izotropowych warunków plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego i Tresca-Guesta. W pracy zaproponowano też proste kryterium plastyczności dla badanego kompozytu z użyciem zmodyfikowanej postaci prawa mieszanin.

5.3. Inne wybrane publikacje

Poniżej przytoczono krótką charakterystykę ważniejszych prac opublikowanych w innych wybranych czasopismach naukowych.

- 1) R. Uścińowicz, „*Influence of temperature on strength joint Al-Cu*”, *Applied Problems of Mechanics and Mathematics (Prikladni Problemi Mehaniki i Matematiki), Ukraina, nr 6, ss. 201–206, 2008.*

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących oceny wytrzymałości na ścinanie złącza zakładkowego Al/Cu podczas jednoosiowego rozciągania. W ramach badań przeprowadzono mikroanalizę składu chemicznego na granicy rozdziału faz w temperaturze pokojowej oraz zmierzono przyrost grubości warstwy dyfuzyjnej w zależności od przyrostu temperatury. Określano wytrzymałość złącz po uprzednim ich wygrzewaniu w zakresie temperatur $523 \div 823$ K i w czasie $40 \div 150$ min. Analiza wyników testów wykazała, że wraz ze wzrostem temperatury w zakresie $523 \div 823$ K następuje wyraźny o ok. 55-58% spadek wartości naprężenia potrzebnego do zniszczenia złącza. Wydłużenie czasu wygrzewania powyżej 90 minut w temperaturze 823 K wywoływało powstawanie wielu nowych faz Al-Cu. Dodatkowym celem badań było określenie optymalnej długości próbki zapewniającej prawidłowe wyznaczenie naprężenia ścinającego podczas rozciągania złącza, biorąc pod

uwagę występowanie geometrycznej nieosiowości obciążenia. Otrzymane wyniki wskazywały na liniową zależność maksymalnej siły ścinającej złącze od długości roboczej próbki. Stwierdzono także, że odporność na ścinanie złącza bimetalicznego mocno zależy od temperatury i czasu wygrzewania, co jest wynikiem zmian strukturalnych zachodzących na granicy styku metali.

- 2) R. Uścińowicz, „Identyfikacja anizotropii własności mechanicznych blachy warstwowej Cu-Al”, *Zeszyty Naukowe, Z 25*, ss. 153–164, 2003.

Zastosowanie odkształceniowej metody łączenia blachy miedzianej z aluminiową przez walcowanie prowadzi do powstania dużych odkształceń plastycznych w obu metalach. Celem zrealizowanych i opisanych w pracy badań było określenie wpływu technologicznego procesu łączenia blach na właściwości mechaniczne blachy bimetalicznej Cu/Al. W badaniach analizowano dane eksperymentalne, uzyskane z testów jednoosiowego rozciągania, przeprowadzonych na próbkach płaskich wyciętych z płaszczyzny poszczególnych blach (miedzianej, aluminiowej i bimetalicznej) pod kątem 0° , 30° , 45° , 60° i 90° względem kierunku walcowania. Do szacowania wartości niektórych parametrów mechanicznych ($R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m , modułu Younga, energii właściwej odkształcenia równomiernego sprężystego i plastycznego) wykorzystano prawo mieszanin. Badano też proces umacniania się blach podczas rozciągania. Zidentyfikowano anizotropię własności mechanicznych bimetalu, jak i jego składników. Odnosiła się ona zarówno do własności sprężystych, jak i plastycznych będących wynikiem zgniotu podczas walcowania. Prawo mieszanin, zastosowane w przypadku bimetalu do szacowania modułu wartości Younga, parametrów naprężeniowych $R_{0,05}$, $R_{0,2}$ oraz R_m , dało dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi.

- 3) R. Uścińowicz, „Some aspects of erosion wear of aluminium alloy in connection with anisotropy of its mechanical properties”, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, t. 37, nr 3*, ss. 135–144, 2002.

Celem badań opisanych w pracy było znalezienie ilościowych zależności pomiędzy zużyciem erozyjnym stopu aluminium Pa6 a jego właściwościami mechanicznymi. Badania przeprowadzono na próbkach płaskich i walcowych wyciętych z kierunku wzdluznego oraz porzecznego względem osi ciągnionego pręta $\phi 40$ mm. Próbki

płaskie były poddawane oddziaływaniu strumienia cząstek SiO_2 pod różnymi kątami względem erodowanej powierzchni. Z kolei próbki walcowe rozciągano monotonicznie, wyznaczając granicę sprężystości, plastyczności, wytrzymałość doraźną, moduł Younga, twardość metodą Vickersa oraz współczynniki dwuparametrycznej funkcji potęgowej aproksymującej krzywą umocnienia. Analizie porównawczej poddano wyniki testów mechanicznych i erozyjnych, przeprowadzonych na próbkach pobranych z różnych kierunków względem osi geometrycznej pręta. Wykazano ścisły związek pomiędzy zużyciem erozyjnym a parametrami określającymi kierunkowe właściwości mechaniczne stopu Pa6. Stwierdzono, że anizotropia właściwości mechanicznych istotnie wpływa na zużycie erozyjne metali oraz na wartość minimalnej energii sprężystej niezbędnej do dekohezji cząstek materiału z jego powierzchni w procesie erozji.

- 4) R. Uścińowicz, „Wpływ rodzaju obciążenia na ewolucję anizotropii odkształceniowej w procesie proporcjonalnego obciążania”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Mechanika, Z. 22, ss. 91–102, 2000.*

Praca dotyczy badań zjawiska powstawania anizotropii odkształceniowej podczas proporcjonalnego monotonicznego obciążania cienkościennych próbek rurkowych ze stali kotłowej 15HM w temperaturze 823 K. W pracy zawarto również opis metodyki badań, w tym charakterystykę stanowiska. Przedstawiono sposób zadawania obciążenia próbek z użyciem osiowej siły rozciągającej, momentu skręcającego i ciśnienia wewnętrznego. Podczas sekwencji obciążania próbek z prędkością naprężenia w zakresie $1,8 \div 48,0$ MPa/min mierzono składowe stanu odkształcenia w trzech kierunkach. Uzyskane z testów wyniki opisano za pomocą zmodyfikowanej niepotencjalnej teorii pełzania anizotropowego. Analiza zmienności wybranych składowych tensora anizotropii, występującego w równaniu tej teorii, pozwoliła ocenić wpływ rodzaju stanu obciążenia na powstawanie i rozwój anizotropii w deformowanym materiale. Stwierdzono, że rodzaj stanu obciążenia wpływa na ewolucję anizotropii w badanej stali, a jej rozwój jest nierozzerwalnie związany z procesem umacniania się materiału. Stal 15HM nabywała anizotropię w efekcie odkształceń plastycznych zarówno w jednoosiowym, jak i płaskim stanie naprężenia.

- 5) R. Uścińowicz, „Wybrane aspekty weryfikacji opisu pełzania stali stopowej w złożonym stanie naprężenia”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, Z4, ss. 207–218, 1997.

W pracy przedstawiono sposób wyznaczania funkcji nieliniowości $G(\sigma_{red}, t')$, która była jednym z elementów równania niepotencjalnej teorii pełzania anizotropowego. Teorię zaproponował Jakowluk i Mieleszko [26] w postaci równania $\dot{\underline{\epsilon}} = G(\sigma_{red}, t') \underline{A}(t') \underline{\sigma}$, gdzie: $\underline{A}(t')$ - tensor anizotropii, $\dot{\underline{\epsilon}}$ - tensor prędkości pełzania, $\underline{\sigma}$ - tensor naprężenia, t' - czas unormowany. Zastosowano ją do opisu procesu pełzania stali 15HM. Testy pełzania realizowano w podwyższonej temperaturze 823 K, wywołując w cienkościennych próbkach rurkowych złożony stan naprężenia. Nieliniowość w ww. równaniu występowała między innymi w równaniu funkcji $G(\sigma_{red}, t')$. Przyjęto potęgową postać funkcji $G(\sigma_{red}, t')$ w postaci równania: $G(\sigma_{red}, t') = a[\beta\sigma_{max} + (1 - \beta)\sigma_i]^b$, gdzie: a, b - współczynniki wyznaczone doświadczalnie, σ_i - intensywność naprężenia, σ_{max} - maksymalne naprężenie główne, β - stała materiałowa z przedziału wartości $\langle 0, 1 \rangle$. Równanie funkcji $G(\sigma_{red}, t')$ było prostą modyfikacją hipotezy Sdobyrieva [27]. Do jego wyznaczenia wymagane było określenie wartości współczynników tensora anizotropii $\underline{A}(t')$, co umożliwiły dane uzyskane z przeprowadzonych testów pełzania. W pracy zawarto również graficzną weryfikację zastosowanej teorii oraz przeprowadzono dyskusję nad wartościami współczynnika β występującego w równaniu funkcji nieliniowości.

Literatura

- [1] S. L. Semiatin i H. R. Piehler, „Formability of sandwich sheet materials in plane strain compression and rolling”, *Metall. Trans. a-Physical Metall. Mater. Sci.*, t. 10, nr 1, ss. 97–107, 1979.
- [2] S. L. Semiatin i H. R. Piehler, „Forming limits of sandwich sheet materials”, *Metall. Trans. a-Physical Metall. Mater. Sci.*, t. 10, nr 8, ss. 1107–1118, 1979.
- [3] S. Sawicki i H. Dyja, „Theoretical and experimental analysis of the bimetallic ribbed bars steel-steel resistant to corrosion rolling process”, *Arch. Metall. Mater.*, t. 57, ss. 61–69, 2012.
- [4] S. Sawicki i H. Dyja, „Wytwarzanie prętów bimetalowych metodą zgrzewania wybuchowego”, *Obróbka Plast. Met.*, t. T. 22, nr 22, ss. 111–119, 2011.
- [5] H. Dyja, S. Mróz, i D. Rydz, *Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych*. Częstochowa.: Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Politechniki Częstochowskiej, 2003.
- [6] H. Dyja, S. Mróz, S. Stradomski, L. Lesik, A. Maranda, i J. Nowaczewski, „Wytwarzanie bimetalowych prętów międz-stop Al metodą wybuchową.”, *Inżynieria Mater.*, t. R. XXIII, , ss. 21–25, 2002.
- [7] J. K. Kim i T. X. Yu, „Forming and failure behaviour of coated, laminated and sandwiched sheet

- metals: A review”, *J. Mater. Process. Technol.*, t. 63, nr 1–3, ss. 33–42, sty. 1997.
- [8] F. Yoshida i R. Hino, „Forming limit of stainless steel-clad aluminium sheets under plane stress condition”, *J. Mater. Process. Technol.*, t. 63, nr 1–3, ss. 66–71, sty. 1997.
- [9] D. N. Lee i Y. K. Kim, „Tensile properties of stainless steel-clad aluminium sandwich sheet metals”, *J. Mater. Sci.*, t. 23, nr 4, ss. 1436–1442, kwi. 1988.
- [10] D. N. Lee i Y. K. Kim, „On the rule of mixtures for flow stresses in stainless-steel-clad aluminum sandwich sheet metals”, *J. Mater. Sci.*, t. 23, nr 2, ss. 558–564, luty 1988.
- [11] S. L. Semiatin i H. R. Piehler, „Deformation of sandwich sheet materials in uniaxial tension”, *Metall. Trans. a-Physical Metall. Mater. Sci.*, t. 10, nr 1, ss. 85–96, 1979.
- [12] S.-H. Choi, K.-H. Kim, K. H. Oh, i D. N. Lee, „Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet”, *Mater. Sci. Eng. A*, t. 222, nr 2, ss. 158–165, luty 1997.
- [13] A. Lamik, H. Leitner, W. Eichseder, i F. Riemelmoser, „A study of the fatigue behaviour of an aluminium clad steel material compound”, *Strain*, t. 44, nr 6, ss. 440–445, 2008.
- [14] H. W. Swift, „Plastic instability under plane stress”, *J. Mech. Phys. Solids*, t. 1, nr 1, ss. 1–18, 1952.
- [15] M. H. Parsa, K. Yamaguchi, i N. Takakura, „Redrawing analysis of aluminum-stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments”, *Int. J. Mech. Sci.*, t. 43, nr 10, ss. 2331–2347, paź. 2001.
- [16] W. Voigt, *Lehrbuch des Krystalphysic*, t. 274. Berlin: Teubner, 1910.
- [17] M. Taya i R. J. Arsenault, *Metal matrix composites: thermomechanical behavior*. Oxford: Pergamon Press, 1989.
- [18] D. C. Dunand, B. Q. Han, i A. M. Jansen, „Monkman-Grant analysis of creep fracture in dispersion-strengthened and particulate-reinforced aluminum”, *Metall. Mater. Trans. a-Physical Metall. Mater. Sci.*, t. 30, nr 3, ss. 829–838, mar. 1999.
- [19] F. Dobeš i K. Milička, „The relation between and time to fracture”, *Met. Sci.*, t. 10, nr 11, ss. 382–384, 1976.
- [20] F. A. Leckie i D. R. Hayhurst, „Constitutive equations for creep-rupture”, *Acta Metall.*, t. 25, nr 9, ss. 1059–1070, 1977.
- [21] W. Szczepiński, *Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1984.
- [22] H. J. Ivey, „Plastic stress–strain relations and yield surfaces for aluminium alloys”, *Arch. J. Mech. Eng. Sci. 1959-1982 (vols 1-23)*, t. 3, nr 1, ss. 15–31, mar. 1961.
- [23] J. Miastkowski i W. Szczepiński, „Doświadczalne badanie powierzchni plastyczności wstępnie odkształconego mosiądzu”, *J. Theor. Appl. Mech.*, t. 3, nr 2, ss. 55–66, 1965.
- [24] G. Hu, K. Zhang, S. Huang, i J.-W. W. Ju, „Yield surfaces and plastic flow of 45 steel under tension-torsion loading paths”, *Acta Mech. Solida Sin.*, t. 25, nr 4, ss. 348–360, sie. 2012.
- [25] R. Uścińowicz, *Procesy odkształcania metalowych kompozytów warstwowych*. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2015.
- [26] A. Jakowluk i E. Mielezko, „No-potential theory of the construction of anisotropic creep constitutive laws”, *Res. Mech.*, t. 16, nr 2, ss. 147–155, 1985.
- [27] W. P. Sdobyrev, „Criterion of long term strength of some high-temperature alloys under multiaxial stress state”, *Izvw. AN SSSR. OTN. Miechanika i Masz.*, t. 6, ss. 93–99, 1959.
- [28] P. F. Aplin i G. F. Eggeler, *Mechanics of Creep Brittle Materials 1*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1989.
- [29] A. M. Lokoshchenko, „Stress-rupture strength of metals in the complex stressed state”, *Strength Mater.*, t. 15, nr 8, ss. 1098–1103, sie. 1983.

Robert Uścińowicz