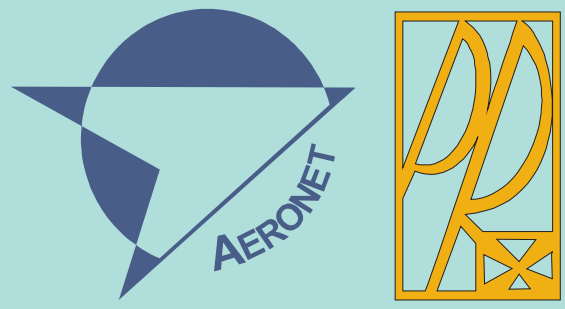


Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



III KONFERENCJA ROCZNA
13-14 Grudnia 2010

ZB 15

Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań

Problemy tarcia w ciernych lotniczych układach hamulcowych

Praca jest realizowana w oparciu o problem zgłoszony przez partnera przemysłowego PZL Świdnik i dotyczy zagadnienia klejenia okładzin hamulcowych do klocków hamulcowych hamulca bębnowego wirnika nośnego śmigłowca Mi-2. Aktualnie połączenie okładzin i klocka hamulcowego jest połączeniem nitowanym. Nity wykonywane są ze stopów Cu i powodują pęknięcia okładzin. Problemy z pęknięciami pojawiły się z powodu wprowadzenia okładzin hamulcowych nowej generacji – bezazbestowych o podwyższonej kruchości (ok. 60% nakładek wykonanych z tłoczywa FO 706 pęka podczas nitowania). Konstrukcja taka doskonale sprawdzała się wcześniej przy stosowaniu nakładek ciernych wykonanych na bazie azbestu. Obecnie istnieje potrzeba zastosaowania klejenia okładzin ciernych do hamulca.

Niniejsze opracowanie dotyczy analizy założeń modelu numerycznego hamulców. Model numeryczny powinien możliwie szeroko ujmować zagadnienia związane z pracą hamulca. Dla przyjętych danych wejściowych model numeryczny powinien pozwolić na określenie:

- przewodzenia ciepła w elementach konstrukcyjnych hamulca,
- rozkładu nacisków kontaktowych pomiędzy elementami trącymi,
- stanu naprężenia w strukturalnych elementach hamulca.

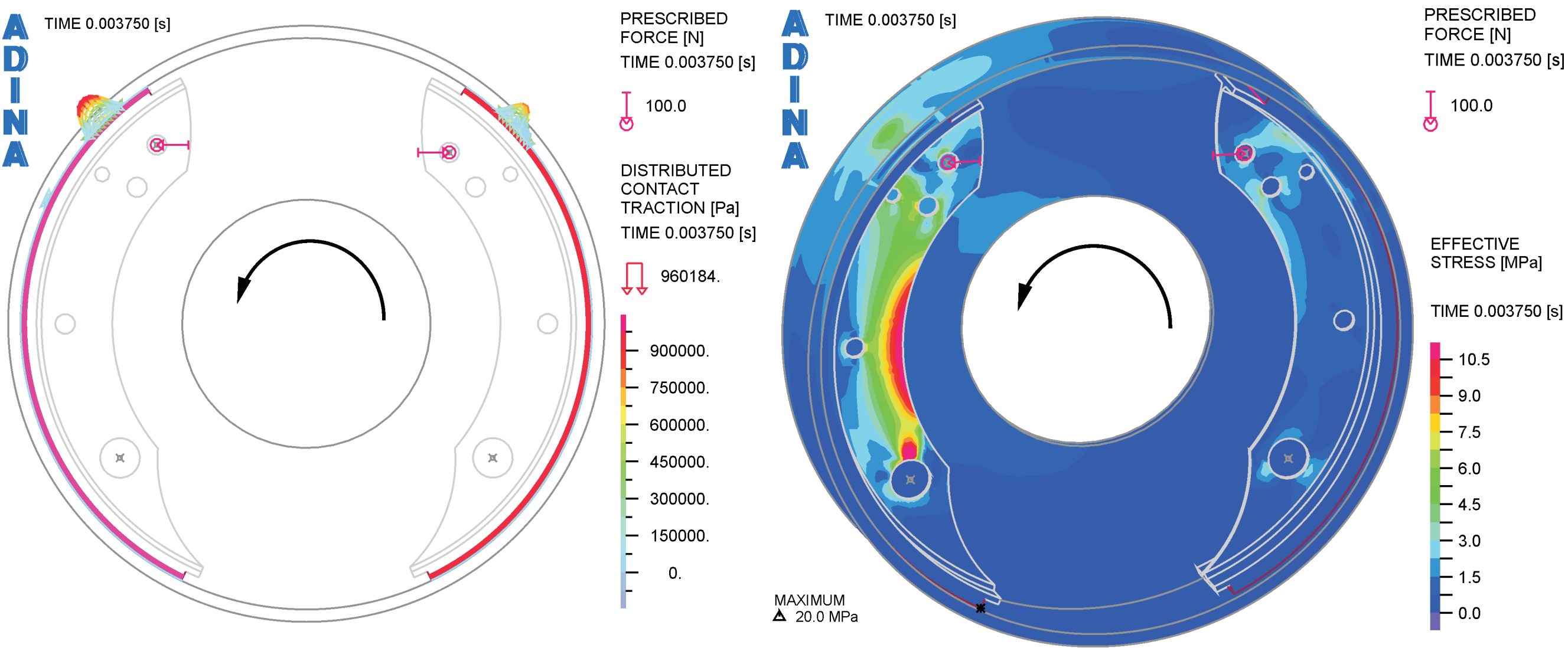
Model numeryczny hamulca bębnowego

Podstawowe założenia modelu numerycznego zostały przyjęte tak, jak w poprzednio opisywanych modelach numerycznych. Model numeryczny obejmuje kompletną trójwymiarową strukturę składającą się z siedmiu elementów strukturalnych składających się na cztery podstawowe grupy materiałowe:

- 2xKlocki 8062 3D solid elements R111, <131° ≠ 2,5x31; (materiał: 30HGSA)
- 2xKlej 3450 3D solid elements R111, <119° ≠ 0,1x30; (materiał: Araldite 64-1)
- 2xOkładzina 6900 3D solid elements R111, <119° ≠ 4,1x30; (materiał: FO706)
- Bęben 4: 9320 3D solid elements ϕ 230x39; (materiał: 40HNMA)

Całkowita liczba użytych elementów wynosi: 27747 i składa się na 45283 węzłów. Pomiedzy okładziną a bębniem założono powierzchni kontakt ze współczynnikiem tarcia $\mu=0,3$. W modelu numerycznym założono, że szczęki hamulcowe posiadają otwory, w których następuje ich utwierdzenie za pomocą bolca oraz otwory w których przyłożono obciążenie siłą.

Hamulce bębnowe mogą występować w układzie symetrycznym (simplex) lub w układzie niesymetrycznym (duplex). Siły hamowania w układzie symetrycznym nie są jednakowe i nie powodują symetrycznego rozkładu naprężeń w elementach strukturalnych. Siła hamowania jest funkcją nacisków jednostkowych rozłożonych na powierzchniach kontaktu. Na rys. 1 pokazano rozkład nacisków jednostkowych na powierzchni kontaktu między okładziną cierną a bębniem hamulca tarczowego. Rozkład nacisków nie jest jednorodny i zależy od kierunku obrotu bębna hamulcowego. Niejednorodność nacisków kontaktowych wynika również z kinematyki dociskania szczęk do bębna. Najwyższe wartości nacisków kontaktowych leżą w przeciwnym końcu niż utwierdzenie szczęk za pomocą sworzni.



Rys. 1. Rozkład nacisków jednostkowych [MPa] na powierzchniach kontaktu

Rys. 2. Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] w elementach strukturalnych hamulca bębnowego

Niejednorodność nacisków kontaktowych prowadzi do niejednorodnego generowania ciepła tarcia, a także zróżnicowanych rozkładów naprężeń zredukowanych w elementach struktury hamulca. Na rys. 2 pokazano rozkład naprężeń zredukowanych dla strukturalnych elementów hamulca bębnowego. W symetrycznym układzie budowy hamulca bębnowego naprężenia zredukowane w poszczególnych szczękach nie są symetryczne. Najbardziej obciążona jest szczeka w której bęben obraca się w kierunku od sworznia z siłą dociskającą szczękę do sworznia utwierdzającego szczękę w ruchu obrotowym. Szczeka po przeciwnej stronie jest mniej obciążona. Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych pojawiają się na wewnętrznej powierzchni blachy żebруюcej szczękę hamulcową oraz lokalnie w okolicy sworznia utwierdzającego szczękę. Naprężenia od nacisków kontaktowych przenoszą się na bęben. Niesymetryczny rozkład naprężeń zredukowanych w bębnie hamulcowym prowadzi do jego niesymetrycznych deformacji wpływających negatywnie na pracę hamulca bębnowego. Wartość obliczonych naprężeń zredukowanych nie przekracza wartości dopuszczalnych dla materiałów użytych na elementy hamulca.

Wnioski

Deformacje i poziom naprężeń zredukowanych w elementach strukturalnych hamulca nie jest duży ze względu na masywną budowę hamulca. Poziom naprężenie zredukowanych w bębnie jest mniejszy niż w szczękach, nie jest to przypadek przewymiarowania konstrukcji ponieważ masywna budowa hamulca zapewnia również dobre odprowadzenie ciepła tarcia. Rozkład naprężeń zredukowanych będzie użyty w optymalizacji konstrukcji hamulca.

Przykłady zastosowania w lotnictwie

MV Agusta F4-Senna



Parametr	Koło motocykla	Hamulec wirnika EC 135
Czas hamowania [s]	5	25-35
Moment hamowania [Nm]	240	Max. 100
Prędkość hamowania [obr/min]	1700	2500
Ciśnienie układu [bar]	30	12
Wymiary dysku średnica [mm] x grubość [mm]	240x5	240x6,5

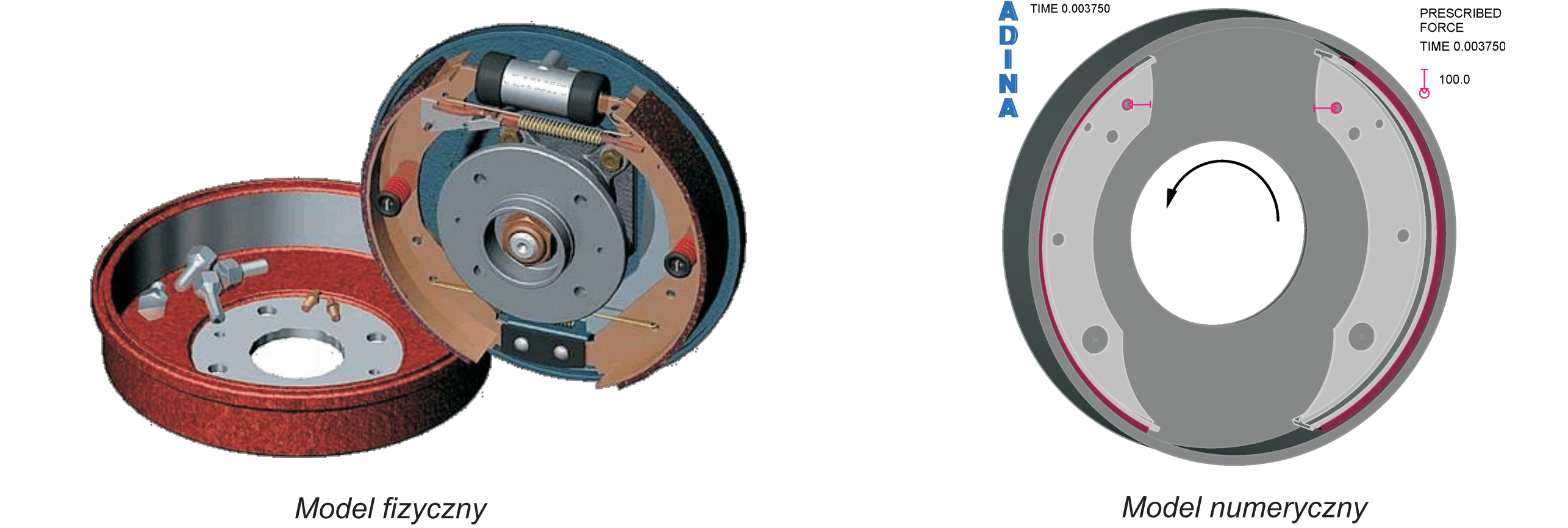
Śmigłowiec EC 135



źródło: <http://www.pomorska.pl>

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

Współpraca z PZL Świdnik w zakresie analizy numerycznej hamulca oraz klejenia okładzin hamulcowych do szczęk hamulca bębnowego śmigłowca Mi-2.



Warunki pracy analizowanego hamulca bębnowego:

- moment hamowania: 1000Nm
- temperatura pracy: do 350 °C
- współczynnik tarcia: 0,3÷0,4
- obroty hamulca: 2557obr/min (hamowanie można rozpocząć po spadku obrotów do 20% prędkości nominalnej).

Wyniki badań

Analiza badań wytrzymałościowych aluminiowych blach typu "tailor-welded blanks"

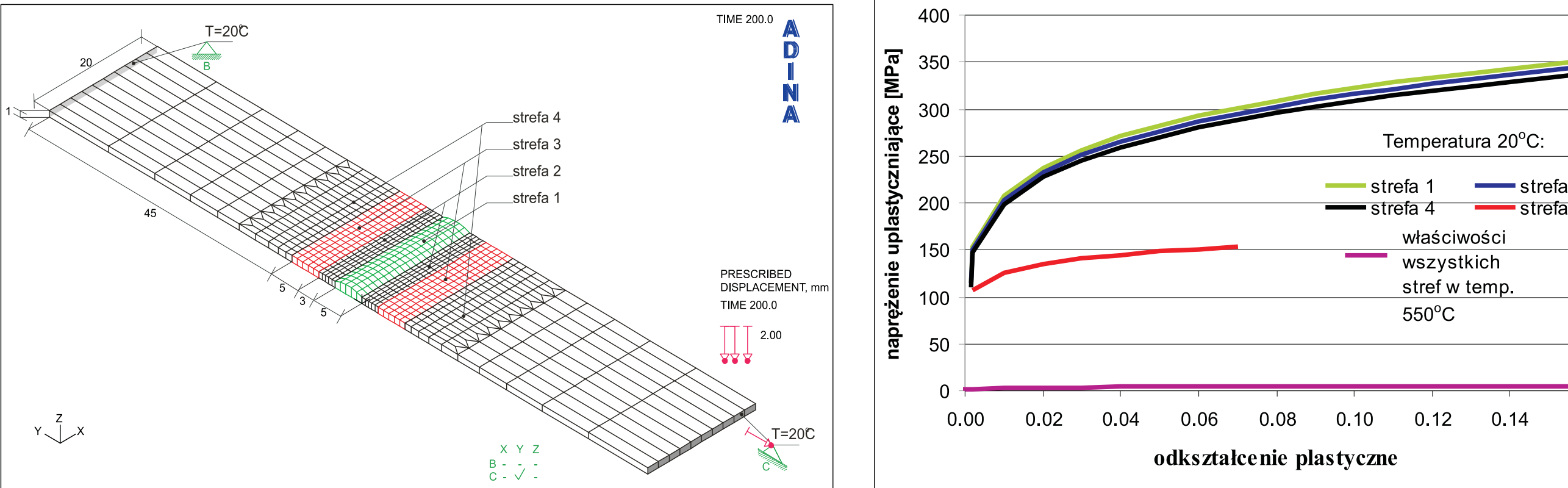
Wyniki badań uzyskane ze statycznej próby rozciągania aluminiowych (EN AW-6061T4) próbek, które zarejestrowano przy pomocy 3-D Digital Image Correlation (DIC) system ARAMIS, porównano z wynikami analiz numerycznych procesu rozciągania. Analizy numeryczne wykonano za pomocą programu ADINA, bazującego na MES. Analizowano stan odkształcenia i naprężenia w rozciąganych próbkach. Symulację numeryczną procesu rozciągania poprzedzono symulacją numeryczną procesu spawania, ponieważ próbki do badań w statycznej próbie rozciągania przygotowano poprzez spawanie metodą TIG 2-ch kawałków materiału o tej samej grubości i jakości. Charakterystyki materiału rodzimego i materiału spoiny wyznaczono w oparciu o badania mechaniczne i metalograficzne. Analiza numeryczna procesu spawania pozwoliła na określenie rozkładu temperatury podczas spawania i chłodzenia spoiny oraz wpływu temperatury na stan naprężeń w strefie wpływu ciepła.

Model numeryczny

Symulacje numeryczne przeprowadzono za pomocą programu ADINA v. 8.6, stosując podejście termomechaniczne. W modelu mechanicznym użyto 820 8-węzłowych elementów typu 3D solid, w związku z czym łączna ilość wygenerowanych węzłów wyniosła 1732. Geometrię i siatkę MES wraz z warunkami brzegowymi i początkowymi pokazano na rys. 1. W modelu założono utwierdzenie na jednej z czolowych powierzchni próbki (oznaczone literą B), prostopadłej do kierunku jej rozciągania. Do drugiej powierzchni przyłożono przemieszczenie (oznaczone literą C), dzięki któremu realizowane było rozciąganie próbki. W modelu wyróżniono cztery obszary o zróżnicowanych właściwości materiałowych:

- strefa 1 - materiał spoiny, który zawiera pierwotne krystality ukierunkowane od linii wtopienia do osi spoiny,
- strefa 2 - strefa przyspoinowa, granicząca z linią wtopienia i obejmująca ziarna, które uległy znacznemu rozrostowi,
- strefa 3, zawierająca rozdrobnione zrekrytalizowane ziarna,
- strefa 4 - materiał rodzimy, umocniony w procesie walcowania blachy na zimno.

Wymiary poszczególnych stref przyjęto na podstawie badań metalograficznych, wykonanych po procesie spawania próbek w obszarze strefy wpływu ciepła. Model materiału zakłada zmianę właściwości mechanicznych w funkcji temperatury. Przyjęte do obliczeń numerycznych krzywe umocnienia dla temperatur w zakresie analizy pokazano na rys. 2.



Rys. 1. Geometria próbki z naniesioną siatką elementów skończonych (zaznaczono warunki brzegowe i początkowe)

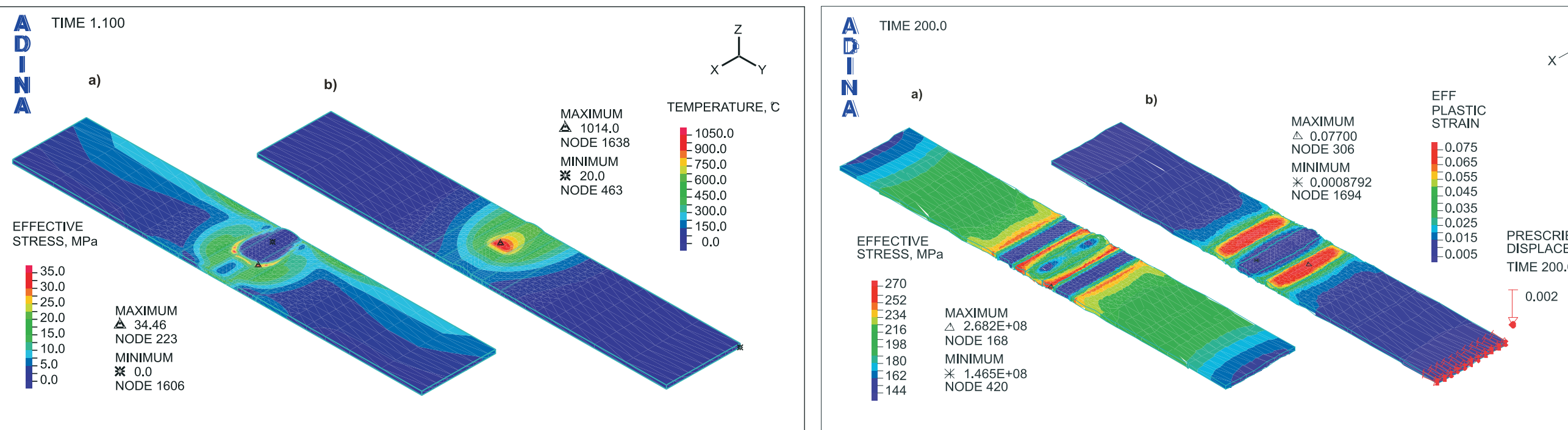
Rys. 2. Krzywe umocnienia materiału w poszczególnych strefach

Siatka elementów skończonych modelu termicznego pokrywa się z siatką modelu mechanicznego, zatem składa się również 820 elementów i 1732 węzłów. W modelu termicznym użyto elementów typu 3D conduction. W zagadnieniu termicznym przyjęto, że na dwóch przeciwnych końcach spawanej próbki, prostopadłych do kierunku rozciągania, temperatura jest stała i wynosi T=20°C. Dla aluminium przyjęto izotropowy model materiału, w którym właściwości termiczne nie zależą od temperatury i wynoszą odpowiednio:

- przewodność cieplna - k=180 W/mK,
- ciepło właściwe - c=896 J/kg°C,
- gęstość - g=2700 kg/m³

Ponadto podczas modelowania procesu spawania przyjęto prędkość spawania v=10 mm/s oraz wewnętrzne źródło ciepła q_v=80°10³ W/m³.

Proces spawania trwa tylko 2 sek. W tym czasie materiał spoiny osiąga temperaturę ~1050°C, potem następuje chłodzenie materiału spoiny do temperatury otoczenia. Symulacja numeryczna procesu spawania wykazała zerową wartość naprężeń w jeziorku spawalniczym. W miarę postępującego ochładzania materiału spoiny następuje wzrost naprężeń. Maksymalne naprężenia lokalizują się w otoczeniu jeziorka spawalniczego i po schłodzeniu do temperatury otoczenia, tj. 20°C osiągają wartość maksymalną wynoszącą ~35MPa. Wskutek oddziaływania ciepła spawania na materiał łączonych próbek powstaje strefa wpływu ciepła, która w istotny sposób wpływa na odkształcalność spawanego materiału. Wyniki symulacji numerycznej procesu rozciągania pokazano na rysunku 4. Rozkład naprężeń tuż przed zerwaniem próbki pokazano na rysunku 4a, a rozkład odkształceń pokazano na rysunku 4b.

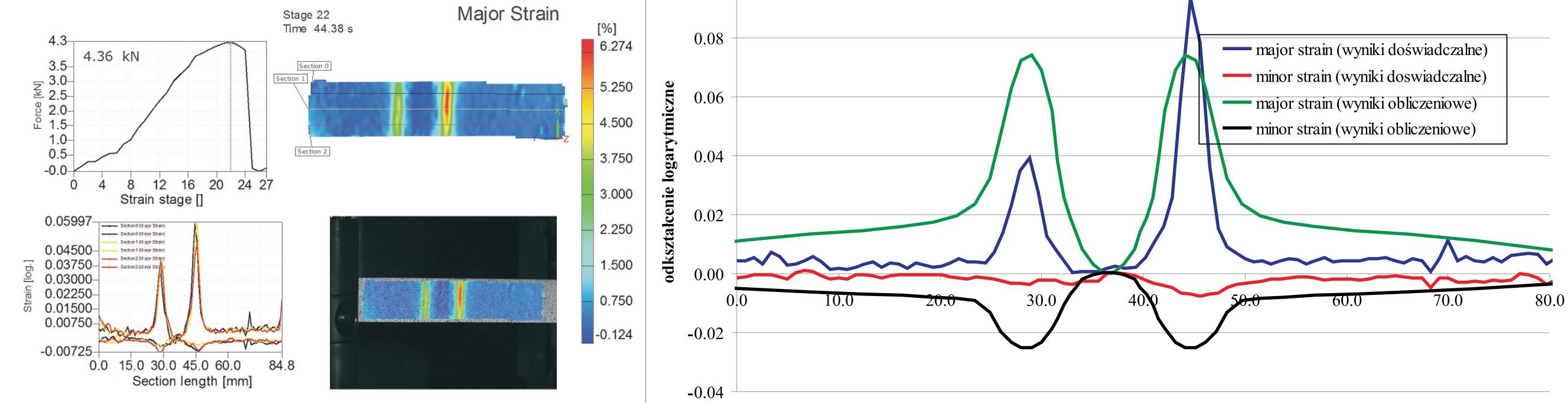


Rys. 3. Rozkład naprężeń (a) i temperatury (b) w spawanej próbce dla czasu t=1,1s

Rys. 4. Rozkład naprężeń (a) i odkształceń (b) w rozciąganej próbce

Podobnie jak to miało miejsce podczas rejestracji wyników za pomocą 3-D Digital Image Correlation (DIC) system ARAMIS (rys. 5) maksymalne odkształcenia w rozciąganej próbce występują w strefie 3, która charakteryzuje się niższymi właściwościami mechanicznymi niż materiał rodzimy (strefa 4) i materiał spoiny (strefa 1 i 2).

Strefa 1 obejmuje materiał spoiny, który zawiera pierwotne krystality ukierunkowane od linii wtopienia do osi spoiny. Strefa ta wykazuje strukturę materiału lanego (odlew), jest sztywna, trudnoodkształcalna, co podczas próby rozciągania prowadzi do zachowania grubości i szerokości próbki w prawie niezmienionej wielkości ($\Delta b^* \Delta g \rightarrow 0$, gdzie: b - szerokość spoiny, g - grubość). Spoina w tego typu złączach pełni rolę usztywnienia materiału, wpływając na rozciąganie strefy przyspoinowej (strefa 2), graniczącej z linią wtopienia i obejmującej ziarna, które podczas spawania znajdowały się w temperaturach bliskich topnienia, wskutek czego uległy znacznemu rozrostowi. Stąd odkształcalność tej strefy jest mniejsza niż strefy 3, zawierającej rozdrobnione zrekrytalizowane po zgnioście i odprężone ziarna. Dodatkowe powiązanie z usztywniającą tą strefę spoiną powoduje, że w strefie 2 nie ma niebezpieczeństwa zainicjowania i propagacji pęknięcia, jeśli wskutek spawania nie wystąpiły wydzieleniowe, niekorzystne zjawiska dyfuzyjne, prowadzące do kruchości rozdzielczej. Strefa 3 to strefa normalizacji, odprężenia i rekrystalizacji. Jest najbardziej plastyczna, „odmocniona” o częściowo całkowicie zrekrytalizowanych ziarnach oraz pozbawiona naprężeń własnych, w tym spawalniczych. Podczas próby rozciągania, właśnie w tej strefie materiał najwcześniej zaczyna płynąć, dochodzi do przewężenia (utrata znacznej części przekroju próbki $\Delta b^* \Delta g \neq 0$), a w efekcie do pęknięcia rozdzielczego - rozerwania próbki. Jeśli spoina jest wykonana prawidłowo to właśnie w tej strefie w wyniku znacznego umocnienia materiału wskutek postępującego odkształcenia plastycznego dochodzi do pęknięcia materiału. Porównanie pomiędzy wynikami badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Wyniki próby rozciągania zarejestrowane za pomocą 3-D Digital Image Correlation (DIC) system ARAMIS (parametry kulowania: p=0,65 MPa, t=2x45 s, d=2,0 mm); po lewej u góry: wykres siły rozciągania, po prawej u góry: rozkład maksymalnych odkształceń plastycznych w rozciąganej próbce, po prawej u dołu: zarejestrowany rozkład odkształceń nałożony na rozciąganą próbkę, po lewej u dołu: rozkład odkształceń maksymalnych i minimalnych dla wybranych przekrojów rozciąganej próbki

Należy zauważyć, że mimo znacznej różnicy pomiędzy eksperymentem a obliczeniami numerycznymi charakter rozkładu odkształceń został zachowany. Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi z symulacji

numerycznej procesu rozciągania próbek spawanych i uzyskanymi z badań doświadczalnych wynika z trudności w dokładnym odwzorowaniu geometrii strefy wpływu ciepła w modelu numerycznym, ponieważ spoina była wykonywana ręcznie.

Wnioski

Wzrastająca liczba publikacji z zakresu zastosowania technologii wykrojek spawanych (TWB) w lotnictwie wskazuje na realną możliwość ich zastosowania na powłokowe elementy strukturalne samolotów. Potencjalne połączenia to: aluminium-aluminiom, tytan-tytan, aluminium-stal lub aluminium-tytan, połączenia blach o tej samej lub różnej grubości. Dlatego w przyszłości planuje się również badanie innych połączeń aniżeli dotychczas badane połączenie: aluminium - aluminium. Wstępne badania przeprowadzone na aluminiowych (6061-T4) próbkach spawanych z blach o tej samej grubości wykazały, że występuje konieczność ograniczenia strefy wpływu ciepła i poprawy tłoczności (wydłużenia), dlatego w ramach dalszych badań zamierzamy przeprowadzić badania na próbkach spawanych elektronowo, a badania tłoczności rozszerzymy np. o próbę tłoczności metodą Erichsena. W oparciu o przeprowadzone symulacje numeryczne i porównanie ich z badaniami doświadczalnymi można stwierdzić, że:

- zastosowanie 3-D DIC system ARAMIS, pozwalającego na monitorowanie całego procesu odkształcania próbki w rzeczywistym czasie, włączając w to inicjację i propagację pęknięcia, pozwoliło na sprawdzenie poprawności przyjętego modelu numerycznego, mimo znacznej różnicy pomiędzy eksperymentem a obliczeniami numerycznymi charakter rozkładu odkształceń został zachowany. Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi z symulacji numerycznej procesu rozciągania próbek spawanych i wynikami doświadczalnymi wynika z trudności w dokładnym odwzorowaniu geometrii strefy wpływu ciepła w modelu numerycznym, ponieważ spoinę wykonano ręcznie,
- obie zastosowane metody: doświadczalna i eksperymentalna wykazały, że wskutek spawania powstaje strefa wpływu ciepła o zróżnicowanych właściwościach materiałowych, wskutek czego pękanie materiału zawsze występuje poza spoiną, w strefie o najniższych właściwościach mechanicznych.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- Kudła K., Wojsyk K.: **Możliwości ograniczenia ilości wprowadzanego ciepła podczas procesów napawania**. Wyd: materiały XVII Międzynarodowej Konferencji "SPAWANIE W ENERGETYCE - TURAWA 2010", Opole - Turawa, 20-21 kwietnia 2010, str. 100-120
- Sadowski T., Sep J., Lacki P., Adamus J., Wojsyk K., Kneć M., Zielecki W.: **A Numerical and Experimental Analysis of Tensile Test of Aluminium Tailor-Welded Blanks**. Wyd. IWCM 20. 20th International Workshop on Computational Mechanics of Materials. Book of Abstracts. 8-10 września 2010, Loughborough, UK, str. 80-81

Prace mgr, dr, hab.

- **Prace inżynierskie obronione:**
 - Borkowicz Marcin : **Wykorzystanie technologii mikrosparwania i mikroprzypawania do spawalniczego przygotowania elementów** . Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk

Prace magisterskie obronione:

- Kościł Piotr: **Wytwarzanie i właściwości połączeń zgrzewanych wybuchowo**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
- Gaik Mariusz: **Wyznaczenie i analiza energii liniowej spawania lukiem krytym na podstawie normatywnego spawania**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
- Marcin Gajda: **Metalograficzna analiza zgrzewanych złącz Ti-Al**. Promotor: dr hab. inż. Zygmunt Nitkiewicz
- Dominika Nykiś : **Modelowanie numeryczne procesu spawania spoiną pachwinową**. Promotor: dr inż. Piotr Lacki
- Magdalena Gała: **Modelowanie numeryczne procesu spawania spoiną czolową**. Promotor: dr inż. Piotr Lacki

Prace inżynierskie planowane

- Wojciech Gasz: **Opracowanie technologii spawania nadstopów niklu ze stalami stopowymi**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Paweł Michalski: **Analiza energii liniowej w procesie spawania STT**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Mariusz Mrozik: **Analiza energii liniowej w procesie spawania CMT**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Wojciech Tyka: **Badania jakościowe szepiania bez udziału materiału dodatkowego w procesie spawania TIG**. Promotor: dr inż. Krzysztof Kudła
- Rafał Aleksanderek: **Możliwości ograniczenia ilości wprowadzanego ciepła podczas spawania nowoczesnych stopów metali**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
- Zbigniew Cimchoi: **Badanie jakości spawanych cienkościennych konstrukcji tytanowych**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk
- Tomasz Machelski: **Zastosowanie gazów formujących do wykonywania połączeń rurowych wysokiej jakości**. Promotor: dr inż. Kwiryn Wojsyk

Prace habilitacyjne

- Tytuł: **Energia liniowa spawania i możliwości jej obliczania**
Autor: Wojsyk Kwiryn
(w trakcie realizacji)