

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Maciej Kotyk

ANALIZA ODPORNOŚCI NA PEKANIE  
MATERIAŁU WARSTWOWEGO Al – Ti

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. DARIUSZ BOROŃSKI

# 1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU

Obecnie budowanym i eksploatowanym maszynom oraz urządzeniom stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące funkcjonalności, niezawodności, szybkości wykonywania zadań, bezpieczeństwa i ostatecznie czasu eksploatacji. Dzięki ciągle doskonalonym metodom wyznaczania trwałości obiektu, możliwym jest uzyskiwanie przebiegów oraz czasów pracy, które jeszcze kilkadziesiąt lat temu były abstrakcyjne z punktu widzenia ówczesnych konstruktorów i użytkowników. Doskonałym przykładem są statki powietrzne. Odpowiednio zlokalizowane i monitorowane pęknięcie nie stanowi obecnie przyczyny do wykluczenia takiego obiektu z dalszej eksploatacji.

Problemami z jakimi muszą zmierzyć się konstruktorzy, aby uzyskać wspomniane wysokie trwałości budowanych maszyn, są nie tylko odpowiednie narzędzia inżynierskie pozwalające na dokonywanie obliczeń konstrukcji, ale także ograniczenia wynikające bezpośrednio z własności mechanicznych i fizykochemicznych materiałów, stosowanych w budowie maszyn. Na współcześnie projektowane i budowane obiekty techniczne, potrzebne są materiały często o sprzecznych własnościach. Konstrukcje muszą być lekkie i jednocześnie zapewniać ochronę radiacyjną, poszycie powinno być twarde, a zarazem doskonale absorbować energię balistyczną, warstwy zewnętrzne muszą być odporne na czynniki środowiskowe oraz dobrze odprowadzać ciepło itp.

Ze względu na te zapotrzebowania, dokonuje się prób wytwarzania materiałów, łączących kilka pozornie sprzecznych ze sobą cech w jednej strukturze. Do tej grupy zaliczają się materiały warstwowe. Część z nich wytwarzana jest metodami wysokoenergetycznymi, a jedną z tych metod jest zgrzewanie wybuchowe.

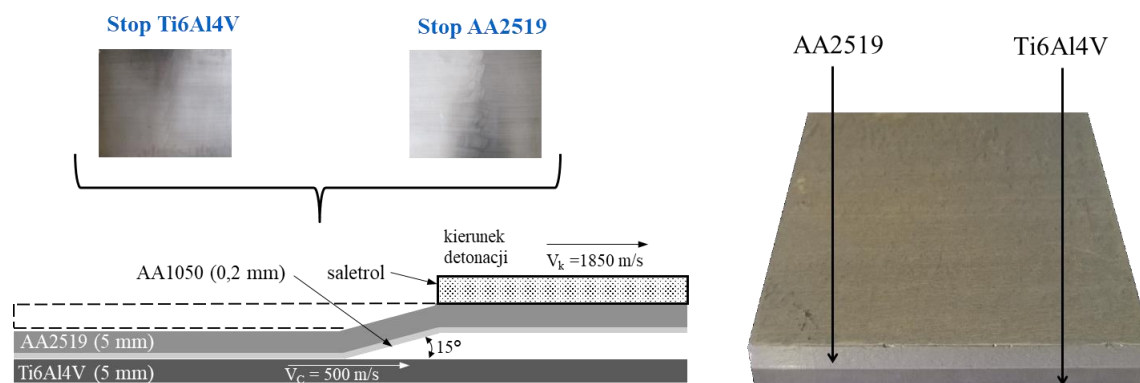
Naturalną konsekwencją powstawania nowych materiałów konstrukcyjnych, jest konieczność poznania ich własności istotnych z punktu widzenia konkretnych zastosowań, dla których są one dedykowane. W przypadku materiałów przeznaczonych na zastosowania lotnicze i kosmiczne, szczególnie ważne są ich własności z zakresu mechaniki pękania, w tym przede wszystkim odporność na pęknięcie.

Dodatkowo tego typu struktury pracują w bardzo zróżnicowanych warunkach środowiskowych, w tym w niskich temperaturach, co w przypadku materiałów warstwowych nakłada kolejne problemy związane z modelowaniem ich własności mechanicznych w analizie konstrukcji.

Znajomość odporności na pęknięcie ma tym większe znaczenie, że w omawianych zastosowaniach dopuszcza się możliwość eksploatacji obiektów z pęknięciami.

Jednym z zupełnie nowych materiałów warstwowych z grupy zgrzewanych ze sobą wybuchowo stopów aluminium i stopów tytanu, jest materiał AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V docelowo o zastosowaniach lotniczych i kosmicznych. Opisujący materiał został zaprezentowany na ilustracji 1.

Biorąc pod uwagę brak dostatecznej wiedzy na temat jego własności mechanicznych, w ramach rozprawy poddano analizie jego odporność na pęknięcie w różnych temperaturach.



Rys. 1. Materiał warstwowy AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V

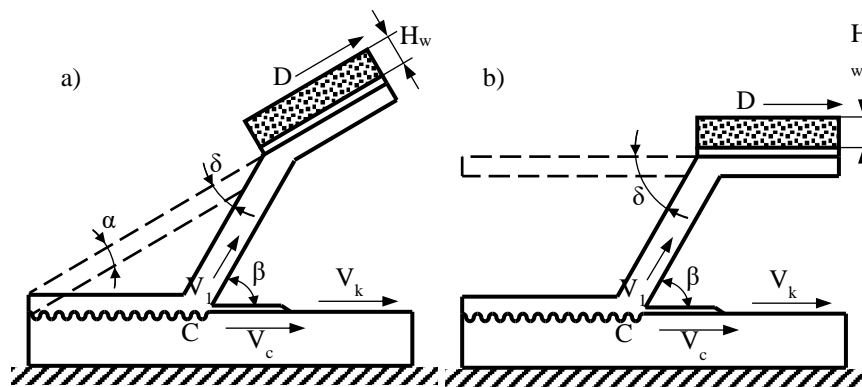
Materiał warstwowy AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V jest nowym materiałem konstrukcyjnym opracowanym we współpracy WAT, PW, IMN, IBK-PAN, UTP i firmy Explomet, doświadczonego

producenta materiałów łączonych metodami wysokoenergetycznymi w różnych konfiguracjach oraz różnej liczbie warstw.

Powstanie tego materiału jest efektem prac nad rozwojem lotnictwa i kosmonautyki, trwających nieustannie od ponad połowy dwudziestego wieku. Kluczowym kryterium jakim kierują się konstruktorzy projektujący tego typu obiekty specjalne, jest wysoka wytrzymałość mechaniczna, przy niewielkiej gęstości i ostatecznej masie finalnego obiektu technicznego. W wyniku tego, skupiono się na wytwarzaniu nowych lub modyfikacji już istniejących stopów tytanu i aluminium, a więc materiałów idealnie wpisujących się w przyjęte kryteria.

Fragmencem badań poznawczych polegających na wyznaczeniu własności mechanicznych, którym autor pracy postanowił się zająć było wyznaczenie oraz analiza odporności na pękanie zarówno materiału warstwowego oraz materiałów bazowych. Do tego celu koniecznym okazało się również poznanie podstawowych własności mechanicznych wyznaczanych w jednoosiowej próbie rozciągania.

Wspomnianą metodą wysokoenergetyczną pozwalającą na uzyskanie tego materiału jest zgrzewanie wybuchowe. Zgodnie z opracowaną technologią, łączenie odbywało się poprzez równoległe platerowanie warstwy aluminium AA2519 i warstwy tytanu Ti6Al4V, przy czym stop lekki stanowił warstwę nakładaną. W wyniku tego tytan nie miał bezpośredniego kontaktu z eksplozją. Przed procesem łączenia, na stop aluminium nawalcowano warstwę stopu AA1050 o grubości 0,2 mm. Proces zgrzewania przeprowadzono tak, aby prędkość rozchodzenia się czoła płomienia podczas detonacji, mieściła się w zakresie od 1850 m/s do 2000 m/s, przy kącie natarcia wynoszącym 15°. Schematycznie przedstawiony proces zgrzewania zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie procesu zgrzewania wybuchowego dwóch płyt, a) zgrzewanie z zadaniem kątem ustawienia płyt, b) zgrzewanie płyt ustawionych równoległe

Na rysunku 2. wyróżniono wielkości będące parametrami zgrzewania wybuchowego, a są nimi:

- D – kierunek detonacji,
- Hw – ilość ładunku wybuchowego,
- $\alpha$  – kąt wstępnego ustawienia płyt,
- $\delta$  – kąt odrzutu,
- V1 – prędkość blachy nakładanej,
- C – strefa zderzenia,
- Vc – prędkość przesuwu strefy zderzenia,
- Vd – prędkość detonacji,
- $\beta$  – kąt zderzenia.

Efektom opisywanych zabiegów jest uzyskanie prędkości łączenia na poziomie 420 – 620 mm/s, oraz powstanie w warstwie łączącej geometrycznie skomplikowanej struktury.

Należy zaznaczyć, że w przypadku materiału warstwowego Al – Ti mamy do czynienia z kompozytem (konstrukcją), a miary jakie wykorzystano do opisu własności mechanicznych są dedykowane dla materiałów jednorodnych. Z tego względu nie należy traktować ich jako stałej materiałowej, a jedynie jako jeden ze sposobów opisu własności mechanicznych materiału.

## **2. SFORMUŁOWANIE CELU ROZPRAWY**

Głównym celem rozprawy było analiza odporności na pękanie materiału warstwowego Al – Ti oraz określenie, czy na podstawie własności mechanicznych materiałów bazowych, możliwym jest określenie tych własności dla materiału warstwowego. Cel ten realizowano dla dwóch warunków temperaturowych tj. dla warunków otoczenia (pokojowych) oraz kriogenicznych.

Wykonanie tego zadania wiązała się z koniecznością realizacji kilku zadań pomocniczych:

1. Wyznaczenie i analiza własności statycznych oraz odporności na pękanie w zakresie liniowo – sprężystym i sprężysto – plastycznym materiałów bazowych.
2. Wyznaczenie i analiza własności statycznych i odporności na pękanie w zakresie liniowo – sprężystym i sprężysto plastycznym materiału warstwowego Al – Ti.
3. Analiza wpływu warunków kriogenicznych na wybrane własności mechaniczne materiałów bazowych i materiału warstwowego Al – Ti.
4. Analiza pól mechanicznych w otoczeniu wierzchołka pęknięcia.

## **3. PRZEDSTAWIENIE ZAKRESU PRACY**

Rozprawa doktorska podzielona została na 4 części opisane 9 rozdziałami, przy czym pierwszy z nich zawierał informacje dotyczące tezy, celów pracy oraz uzasadnienie wyboru tematu.

Pierwsza część (rozdziały drugi, trzeci i czwarty) pracy, zawiera analizę stanu wiedzy, na bazie której zbudowano plan badawczy. Dokonano również wyboru narzędzi jakimi posługiwano się podczas analizy odporności na pękanie materiału warstwowego Al – Ti w obu warunkach temperaturowych.

W rozdziale piątym scharakteryzowano materiały bazowe oraz materiał warstwowy Al – Ti, powstały w wyniku zgrzewania wybuchowego wcześniej wspomnianych materiałów. W tym rozdziale omówiono wybrane pozycje literaturowe traktujące o wyznaczaniu własności mechanicznych wymienionych materiałów, a także zawarto informacje o ich dotychczasowym wykorzystaniu. Określono również docelowe zastosowanie opisywanego materiału warstwowego oraz wyjaśniono, dlaczego właśnie te materiały bazowe, zostały ze sobą połączone w celu wytworzenia kompozytu.

W trzeciej części (rozdział szósty) zawarto informacje odnośnie metodyki badań oraz zaplecza badawczego niezbędnego do realizacji postawionych celów.

Kolejna część (rozdział siódmy i ósmy) zawiera wyniki badań eksperymentalnych oraz ich analizę.

W rozdziale ostatnim przedstawiono wnioski końcowe i kilka koncepcji dalszych kierunków badań materiałów warstwowych.

## **4. ANALIZA STANU WIEDZY**

W części pierwszej analizy stanu wiedzy dokonano przeglądu literatury traktującej o badaniach własności mechanicznych materiałów warstwowych. Ze względu na znaczną ilość dostępnej literatury w tym zakresie ograniczono się do trzech grup materiałów. Pierwszą z nich stanowiły laminaty zbudowane na bazie stopów aluminium, drugą natomiast laminaty zbudowane na bazie stopów tytanu, trzecią zaś stanowiły materiały warstwowe w skład których wchodziły zarówno stopy tytanu i stopy aluminium.

Druga część analizy stanu wiedzy dotyczyła przeglądu ogólnodostępnych pozycji literaturowych w których zawarto informacje na temat metod określania odporności materiałów na pękanie. W opisie przedstawionym w tej części krótko opisano wybrane metody badania materiałów liniowo – sprężystych oraz sprężysto – plastycznych. Fragment ten w sposób szczególny pozwolił na wybranie metod opisu szukanej charakterystyki mechanicznej dla badanego materiału warstwowego oraz materiałów bazowych.

Trzecia część analizy stanu wiedzy miała na celu zgromadzenie informacji dotyczących wyznaczania charakterystyk mechanicznych metali w obniżonych temperaturach. Na podstawie odnalezionych źródeł ustalono, że najprecyzyjniejszą metodą badań w tak niskich temperaturach są badania z zastosowaniem specjalnie przygotowanych komór środowiskowych. Należy zaznaczyć, iż w badaniach zasadniczych zaprezentowanych w pracy zastosowano właśnie taką komorę.

Łącznie w pracy dokonano analizy 168 pozycji literaturowych w znacznej części anglojęzycznych.

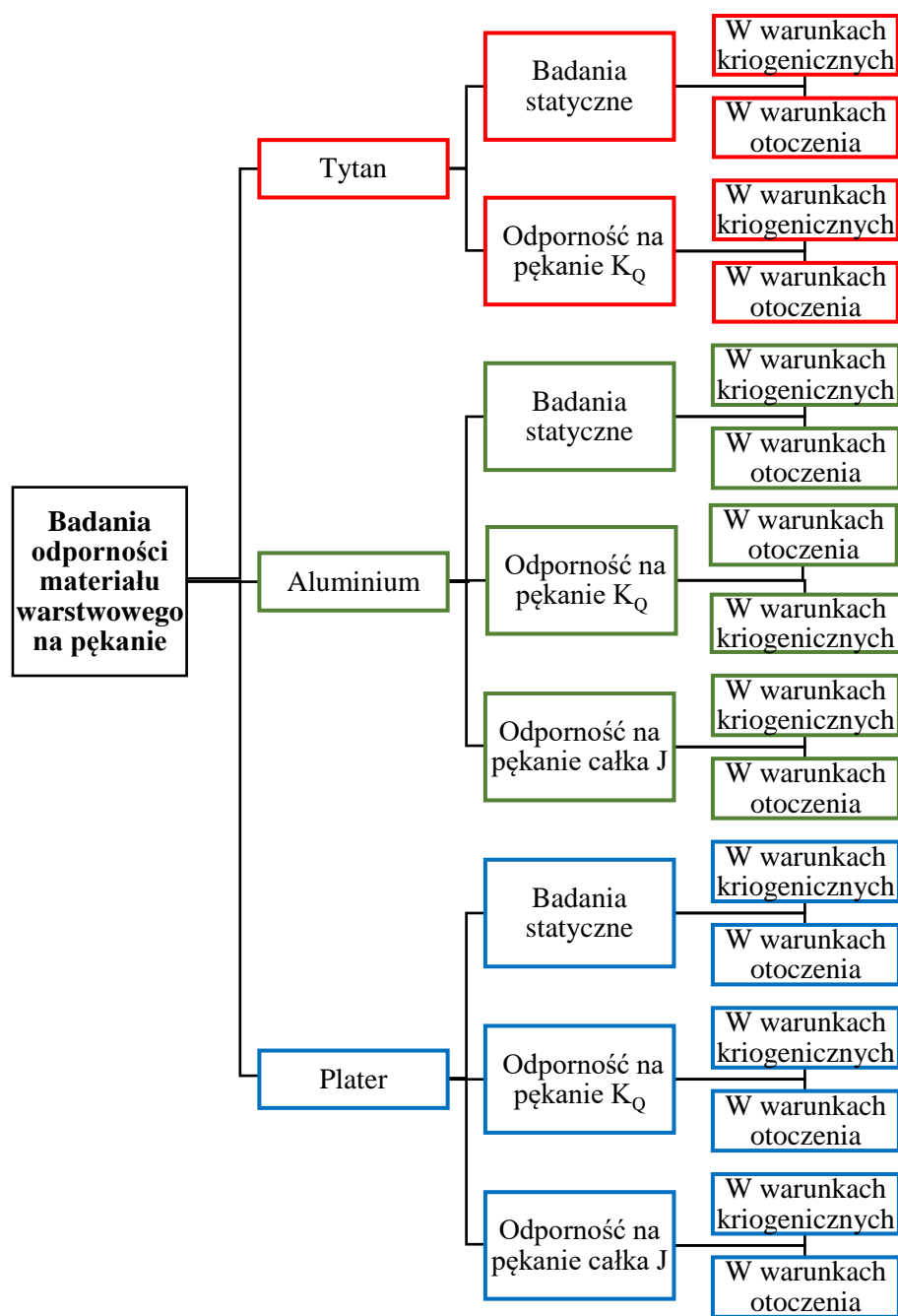
## 5. ZAKRES BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Program badań własnych prowadzonych w celu dokonania analizy odporności na pękanie materiału warstwowego Al – Ti został przedstawiony na rysunku 3. Początkowo dla materiałów bazowych oraz materiału warstwowego wyznaczono własności wynikające z przeprowadzenia jednoosiowej próby rozciągania. Było to konieczne, ze względu na ich wykorzystanie w późniejszych badaniach. Wyznaczanie własności statycznych było szczególnie zasadne dla warunków kriogenicznych, bowiem ze względu na niewiele pozycji literaturowych traktujących o opisywanym zagadnieniu, niemożliwym okazało się jednoznaczne określenie tych własności w sposób inny niż eksperymentalnie.

Dla celów porównawczych, oprócz odporności na pękanie materiału warstwowego Al – Ti wyznaczono również odporność na pękanie dla materiałów bazowych. Należy zaznaczyć, że w tym celu wyznaczono odporność na kruche pękanie metodą maksymalnej eksperymentalnej wartości współczynnika intensywności naprężeń oraz maksymalną eksperymentalną wartość całki J.

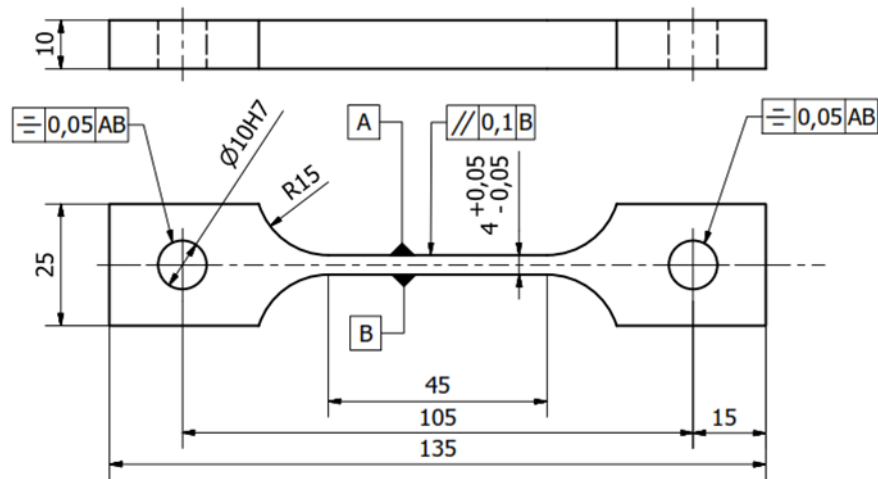
Jak widać na rysunku 3, zrezygnowano z wyznaczania odporności na pękanie w zakresie sprężysto – plastycznym dla stopu tytanu. Decyzję tą podjęto na podstawie analizy wyników otrzymanych podczas wyznaczania  $K_Q$  z których jednoznacznie wynikało, że pękanie w stopie tytanu Ti6Al4V ma charakter kruchy.

Łącznie w pracy zaprezentowano wyniki badań 99 próbek o różnej geometrii.



Rys. 3. Schemat programu badań własnych

Podczas wyznaczania własności statycznych w obu temperaturach wykorzystano próbki wiosełkowe 5-krotne o kształcie i wymiarach przedstawionych na rysunku 4. Cechą charakterystyczną dla nich, były otwory znajdujące się w częściach chwytowych. Rozwiązanie to było pomocne podczas badań w komorze środowiskowej. Zastosowane otwory powodowały, że siła rozciągająca była przenoszona przez sworznie i trzpienie w wyniku czego oddalono uchwyty mocujące maszyny wytrzymałościowej od próbki i ograniczono tym samym ilość dostarczanego ciepła do komory środowiskowej. Wszystkie te zabiegi prowadziły do zmniejszenia ilości ciekłego azotu, potrzebnego do wychłodzenia próbek oraz zmniejszenia zakłóceń w odczytach, spowodowanych niską temperaturą.

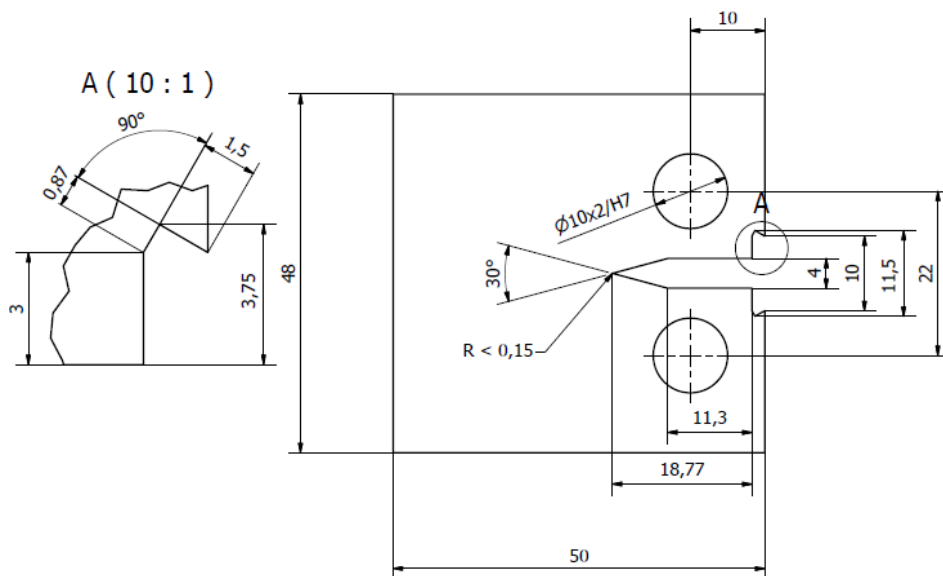


Rys. 4 Wymiary próbki z otworem w części chwytowej stosowanej do badań statycznych w temperaturze otoczenia i kriogenicznej

Do badań odporności na pękanie zarówno materiału warstwowego Al – Ti, jak również materiałów bazowych w obu temperaturach, wykorzystano próbki zwarte typu CT. Służyły one zarówno do wyznaczania wartości współczynnika intensywności naprężeń  $K_Q$  i wartości całki J. Kształt i wymiary opisywanej próbki zostały przedstawione na rysunku 5.

Szczególnie istotnym z punktu widzenia badań związanych z mechaniką pękania, jest wykonanie karbu mechanicznego spiętrzającego naprężenia i gwarantującego prostopadłą do grzbietu próbki propagację szczeliny. Celem uzyskania możliwie małego promienia dna karbu mechanicznego, element ten wykonano metodami elektroerozyjnymi (WEDM), a średnica drutu podczas drążenia wynosiła 0,25 mm.

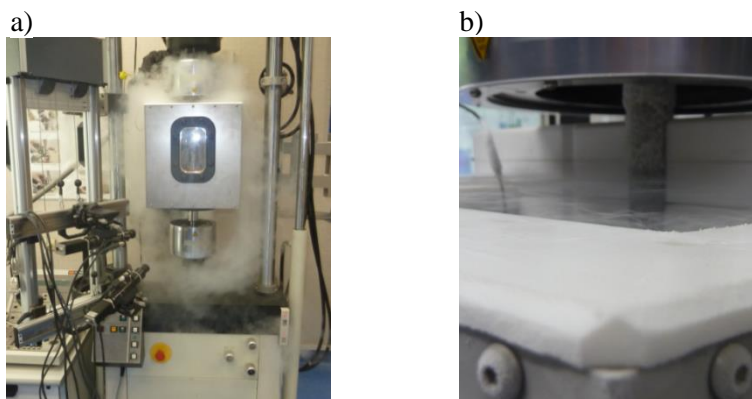
Na frontowej części próbki wykonano nacięcia, tworzące zamek będący elementem umożliwiającym mocowanie czujnika rozwarcia próbki (ekstensometru COD).



Rys. 5. Wymiary próbki zwartej do badań odporności na pękanie

## 6. BADANIA W WARUNKACH KRIOGENICZNYCH

Jak już wcześniej zaznaczono, część z badań odbywała się w warunkach kriogenicznych, rozumianych jako zanurzenie badanej próbki w kąpeli z ciekłego azotu. Aby przez cały czas trwania eksperymentu zapewnić jednakowe warunki temperaturowe, badaną próbkę umieszczano w komorze środowiskowej, której dolny trzpień mocowano bezpośrednio w uchwycie maszyny wytrzymałościowej. Za wyjątkiem elementów termoizolacyjnych, komorę wykonano z inconelu, natomiast pokrywę celem uniknięcia przymarzania wykonano z teflonu. Opisywaną aparaturę przedstawiono na ilustracji 6.

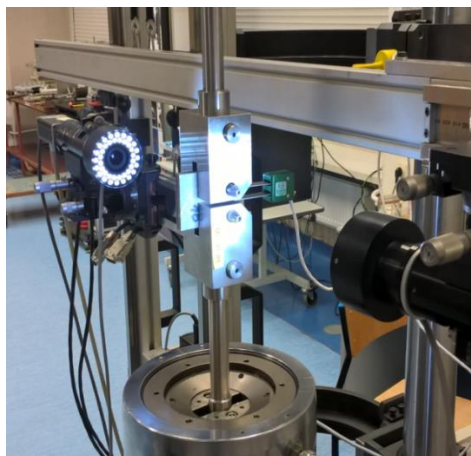


Rys. 6. Komora środowiskowa wykorzystana podczas badań w temperaturze kriogenicznej, a) komora zamontowana w maszynie wytrzymałościowej, b) widok do wnętrza komory

Trudno jednoznacznie określić, jaka ilość ciekłego azotu jest potrzebna do wykonania badań. Naturalnym jest, że duża jego ilość była potrzebna do początkowego wychłodzenia komory. Na początku badań, miała ona bowiem temperaturę otoczenia. Po wychłodzeniu komory zużycie ciekłego azotu znacznie malało, jednak sama wymiana próbki powodowała wprowadzenie do wnętrza komory dużej ilości ciepła.

## 7. METODA GENEROWANIA PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH

Zarówno podczas badań jednoosiowej próby rozciągania, jak również przy generowaniu pęknięcia zmęczeniowego w próbkach CT, do obserwowania zjawisk, jakie zachodziły na powierzchni badanego materiału, stosowano cyfrowe kamery umieszczone po obu stronach próbki. Zasadniczym ich zadaniem było umożliwienie automatyzacji procesu generowania pęknięcia zmęczeniowego. Kamery były umieszczone tak, aby w początkowej fazie na rejestrowanym przez nie obrazie widoczny był karb technologiczny, wraz z obszarem, w którym to później doprowadzano do powstania pęknięcia zmęczeniowego. Układ kamer do obserwowania pęknięcia w próbce przedstawiono na rysunku 7.

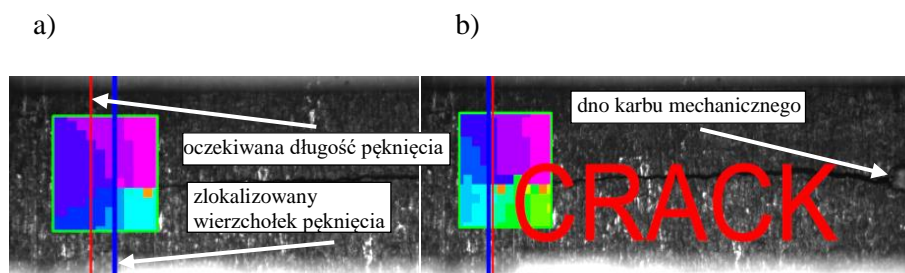


Rys. 7. Układ kamer pozwalający na obserwację i późniejszą analizę przyrostu pęknięcia w próbkach CT podczas wyznaczania odporności materiału na pękanie



Celem obserwacji, analizy i kontroli przyrostu pęknięcia w próbce zwartej, a także sterowania maszyną, wykorzystano program komputerowy. Zasadniczym zadaniem oprogramowania było zatrzymanie generowania szczeliny zmęczeniowej w momencie, gdy długość pęknięcia zmęczeniowego osiągnie zadaną długość.

Pomiar długości opisywanego pęknięcia realizowano poprzez automatyczną analizę map przemieszczeń wyznaczanych metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Do analizy bieżącego położenia wierzchołka pęknięcia zastosowano analizę gradientów przemieszczenia wzdłuż kierunku działania siły obciążającej próbkę CT. W przypadku, gdy nanoszona przez program linia aktualnego położenia wierzchołka pęknięcia pokryła się lub przekroczyła tą, nanoszoną przez użytkownika linię graniczną, wówczas następowało zatrzymanie pracy maszyny. Opisywany proces w formie graficznej zaprezentowano na rysunku 8.



Rys. 8. Schematyczne przedstawienie wykrywania wierzchołka pęknięcia, a) wierzchołek pęknięcia przed linią graniczną, b) wierzchołek pęknięcia za linią graniczną

Prezentowane rozwiązanie z punktu widzenia planu badań okazało się korzystne. Umożliwiało ono ustawienie dowolnej w pewnym zakresie oczekiwanej długości pęknięcia zmęczeniowego. Kluczowym dla analiz porównawczych było uzyskanie możliwie zbliżonych do siebie początkowych długości pęknięcia, które dla badań współczynnika intensywności naprężeń przyjęto jako 20 mm, a dla całej J 18 mm. Zastosowanie optycznego pomiaru długości pęknięcia zintegrowanego z systemem sterowania maszyny pozwoliło na uzyskanie różnic początkowych długości pęknięcia na poziomie mniejszym niż 0,5 mm.

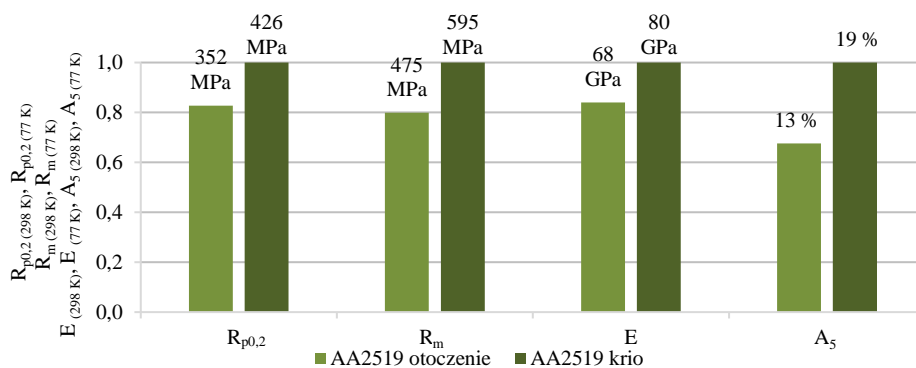
## 8. WPLYW TEMPERATURY NA WŁASNOŚCI STATYCZNE ANALIZOWANYCH MATERIAŁÓW

Po opracowaniu wyników badań okazało się, że charakterystyki mechaniczne wyznaczone dla tego samego materiału, ale w różnych warunkach temperaturowych nie są jednakowe.

Różnice pomiędzy wybranymi własnościami mechanicznymi wyznaczonymi w warunkach otoczenia i kriogenicznych dla stopu aluminium AA2519 przedstawiono w tabeli 1. Porównanie wybranych własności mechanicznych opisywanego stopu w formie graficznej zaprezentowano na rysunku 9.

Tabela 1 Różnice pomiędzy uśrednionymi wartościami uzyskanymi podczas monotonicznej próby rozciągania stopu aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i kriogenicznych

materiał	$\overline{R}_{p0,2}$	$\overline{R}_m$	$\overline{E}$	$\overline{A}_5$
	MPa	MPa	GPa	%
AA2519 otoczenie (298 K)	352,5	475,3	67,5	12,9
AA2519 krio (77 K)	426,0	595,0	80,3	19,1
porównywane materiały	różnica, $\Delta X = (X_{77\text{ K}} - X_{298\text{ K}}) / X_{298\text{ K}}$ , %, gdzie X: $R_m, R_{p0,2}, E, A_5$			
różnica %	$\Delta R_{p0,2}$	$\Delta R_m$	$\Delta E$	$\Delta A_5$
	20,9	25,2	19,0	47,9



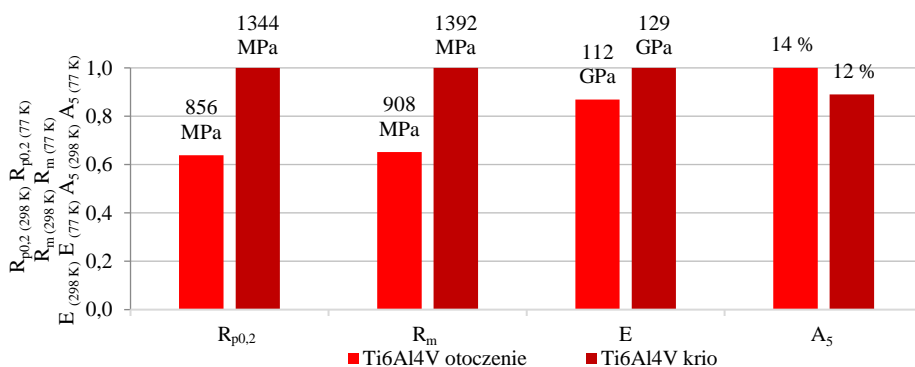
Rys.9. Porównanie własności statycznych stopu aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i kriogenicznych

Obniżenie temperatury do wartości 77 K spowodowało zmianę wszystkich podstawowych własności mechanicznych tego stopu. Tak więc doraźna wytrzymałość na rozciąganie w odniesieniu do warunków otoczenia wzrosła o 25,2%, a umowna granica plastyczności również zwiększyła się o niespełna 21%. Po opracowaniu wyników badań okazało się, że warunki kriogeniczne spowodowały zwiększenie wydłużenia przy zerwaniu w przypadku aluminium aż o 47,9%. Zwiększeniu uległa również sztywność, bowiem moduł sprężystości podłużnej wzrósł średnio z wartości 67,5 GPa w warunkach otoczenia do 80 GPa w warunkach kriogenicznych, co daje ponad 19% wzrost. Biorąc pod uwagę prezentowane wyniki można stwierdzić, że warunki kriogeniczne korzystnie wpływają na własności mechaniczne aluminium AA2519.

Już na etapie eksperymentu zaobserwowano, że stop tytanu Ti6Al4V charakteryzuje się zmianą własności mechanicznych w temperaturach kriogenicznych. Różnice te, dla uśrednionych wartości uzyskanych podczas prób przedstawiono w tabeli 2. Wyniki badań zdecydowano się przedstawić również w formie graficznej w sposób normalizowany do 1 (rys. 10).

Tabela 2. Różnice pomiędzy uśrednionymi wartościami uzyskanymi podczas próby rozciągania tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i kriogenicznych

material	$\bar{R}_{p0,2}$	$\bar{R}_m$	$\bar{E}$	$\bar{A}_5$
	MPa	MPa	GPa	%
Ti6Al4V otoczenie (298 K)	858,5	907,9	111,7	13,6
Ti6Al4V krio (77 K)	1344,2	1392,4	128,6	12,1
porównywane materiały	różnica, $\Delta X = (X_{77\text{ K}} - X_{298\text{ K}}) / X_{298\text{ K}}$ , %, gdzie X: $R_m, R_{p0,2}, E, A_5$			
różnica %	$\Delta R_{p0,2}$	$\Delta R_m$	$\Delta E$	$\Delta A_5$
	56,6	53,4	15,1	-11,0



Rys. 10. Porównanie własności statycznych stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i kriogenicznych

Podobnie jak w poprzednim przypadku, dla warunków kriogenicznych nastąpił znaczny wzrost wybranych własności mechanicznych stopu tytanu Ti6Al4V za wyjątkiem wydłużenia przy zerwaniu. Obliczono, że umowna granica wytrzymałości na rozciąganie opisywanego materiału w warunkach kriogenicznych wzrosła średnio o 53,4 %, podobnie jak wartość umownej granicy plastyczności, która

wzrosła o ponad 56%. W odróżnieniu od AA2519 w warunkach otoczenia wydłużenie przy zerwaniu było dłuższe niż w warunkach kriogenicznych. Okazało się, że w 77K cecha ta zmniejszyła się o 11%. Należy zaznaczyć, że sztywność tytanu również uległa zmianie. Moduł Younga wzrósł o nieco mniejszą wartość niż w przypadku aluminium, a zmiana średniej wartości wynosiła 15,1 %.

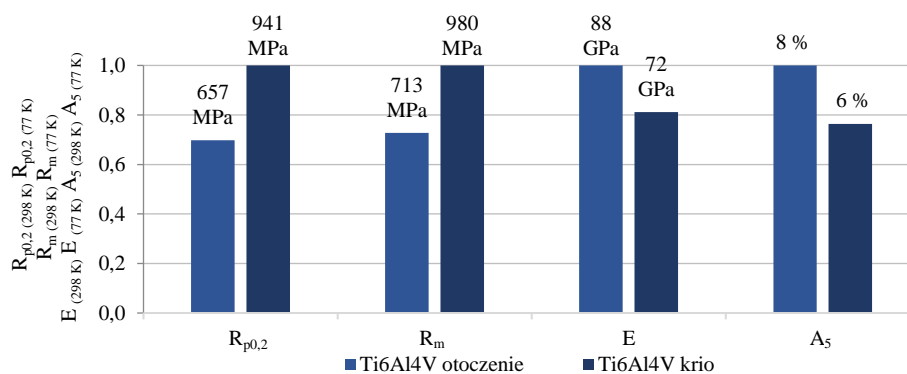
Wykluczając wydłużenie przy zerwaniu można stwierdzić, że warunki kriogeniczne również wpływają pozytywnie na statyczne własności stopu Ti6Al4V.

Otrzymane wyniki świadczą o tym, że materiały bazowe nie wykazują wyraźnej granicy plastyczności. Wytrzymałość na rozciąganie stopu aluminium jest wyższa niż niektórych gatunków stali węglowych. Dodatkowo obydwa materiały, charakteryzują się występowaniem strefy plastycznej.

Dla materiału warstwowego również obliczono różnicę pomiędzy własnościami mechanicznymi wyznaczonymi w warunkach otoczenia i kriogenicznych. Wyniki opisywanych analiz przedstawiono w tabeli 3. Normalizowane do jedynki wyniki pomiarów oraz procentowe różnice pomiędzy nimi, zamieszczono na rysunku 11.

Tabela 3. Porównanie uśrednionych własności statycznych, materiału warstwowego Al – Ti w warunkach otoczenia i kriogenicznych

material	$\overline{R_{p0,2}}$	$\overline{R_m}$	$\overline{E^*}$	$\overline{A_5}$
	MPa	MPa	GPa	%
Al - Ti otoczenie (298 K)	656,8	713,1	87,78	7,86
Al - Ti krio (77 K)	940,8	980,3	71,2	6
porównywane materiały	różnica, $\Delta X = (X_{77\text{ K}} - X_{298\text{ K}}) / X_{298\text{ K}}$ , %, gdzie X: $R_m$ , $R_{p0,2}$ , E, $A_5$			
różnica %	$\Delta R_{p0,2}$	$\Delta R_m$	$\Delta E$	$\Delta A_5$
	43,2	37,5	-18,9	-23,7



Rys. 11. Porównanie własności statycznych, materiału warstwowego Al – Ti w warunkach otoczenia i kriogenicznych

Materiał warstwowo również uległ umocnieniu w temperaturze kriogenicznej. Średnia wartość doraźnej wytrzymałości przy rozciąganiu wzrosła z 713 MPa do 980 MPa co daje wzrost o 37,5%. Umowna granica plastyczności również uległa zwiększeniu o 43,2%. Pewnego rodzaju wyjątkiem w odniesieniu do materiałów bazowych, jest zjawisko spadku modułu sprężystości podłużnej oraz wydłużenia przy zerwaniu, dla materiału warstwowego w warunkach kriogenicznych. Zmiana pierwszej z opisywanych wartości wynosiła 18,9% Spadek drugiej z nich, został zaobserwowany w przypadku tytanu, jednak zmiana wskutek obniżenia temperatury nie była aż tak gwałtowna. Opisywana wartość dla materiału warstwowego w warunkach kriogenicznych spadła o niecałe 24%.

## 9. WPLYW TEMPERATURY NA ODPORNÓŚĆ NA PĘKANIE MATERIAŁU WARSTWOWEGO I MATERIAŁÓW BAZOWYCH

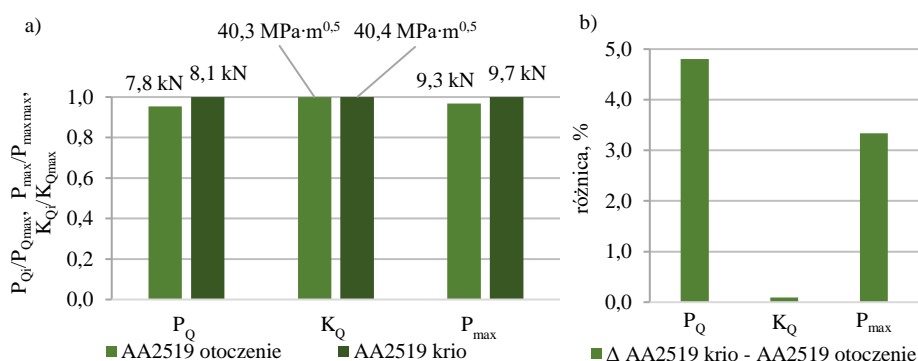
### 9.1. Aluminium AA2519

Uśrednione wyniki badań odporności na pękanie, metodą maksymalnej eksperymentalnej wartości współczynnika intensywności naprężeń stopu aluminium AA2519 w warunkach otoczenia, wraz z wybranymi wartościami charakterystycznymi, zestawiono w tabeli 4. Zawiera ona porównanie wyników dla tego samego materiału, ale badanego w różnych warunkach temperaturowych.

Graficzne przedstawienie różnic wykazanych w tabeli, zaprezentowano na ilustracji 12.

Tabela 4. Zestawienie uśrednionych wyników badań odporności na pękanie dla stopu aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i kriogenicznych

oznaczenie	$\overline{P}_Q$	$\overline{K}_Q$	$\overline{P}_{max}$	$\overline{P}_{max} / \overline{P}_Q$
	kN	MPa·m <sup>0,5</sup>	kN	N/N
AA2519 otoczenie	7,77	40,33	9,34	1,20
AA2519 krio	8,14	40,36	9,65	1,19
porównywane materiały	różnica, $\Delta X = (X_{77\text{ K}} - X_{298\text{ K}}) / X_{298\text{ K}}$ , %, gdzie X: $P_Q, K_Q, P_{max}$			
różnica %	$\Delta P_Q$	$\Delta K_Q$	$\Delta P_Q$	$\Delta P_{max} / P_Q$
	4,8	0,1	3,3	-1,4



Rys.12. Porównanie uśrednionych wyników badań odporności na pękanie metodą maksymalnej eksperymentalnej wartości współczynnika intensywności naprężeń, a) normalizowane do jedynki wybrane własności materiałowe, b) różnice procentowe pomiędzy wyznaczonymi wartościami

Różnice pomiędzy odpornościami na pękanie w zakresie liniowo – sprężystym wyznaczonymi w warunkach otoczenia i warunkach kriogenicznych dla AA2519 są niewielkie. Zasadnicza rozbieżność wystąpiła w wartości siły  $P_Q$ . W warunkach kriogenicznych, średnia wartość uzyskanej siły była wyższa o niespełna 5%. Wartości średnie sił maksymalnych  $P_{max}$  zarejestrowanych podczas badań różniły się od siebie o 3,3%, przy czym wartość wzrosła dla badań przeprowadzonych w 77 K. Zauważono, że tendencja wzrostu wartości maksymalnej siły miała podobny charakter, jak w badaniach statycznych, jednak trudno te wartości porównywać. W badaniu odporności na kruche pękanie występuje ostry karb w którym następuje spiętrzenie naprężeń. Największą wątpliwość budzi średnia wartość ilorazu  $P_{max}/P_Q$  ponieważ w obu przypadkach wartość ta jest większa od 1,1 co stanowi podstawę do odrzucenia tej miary, jako odpowiedniej dla tego materiału. Z tego względu postanowiono posługiwać się pojęciem wartości obliczeniowej  $K_Q$ , a określenie miary odporności na pękanie poprzez  $K_{IC}$  w opisywanym przypadku zaniechać. Porównując ze sobą otrzymane wartości  $K_Q$  można stwierdzić, że warunki kriogeniczne nie wpłynęły znacząco na opisywaną wielkość. Należy jednak zwrócić uwagę na zjawisko zmiany (spadku) wartości ilorazu  $P_{max}/P_Q$  w warunkach kriogenicznych. Świadczy to o zmianie charakteru pękania na zbliżony do kruchego.

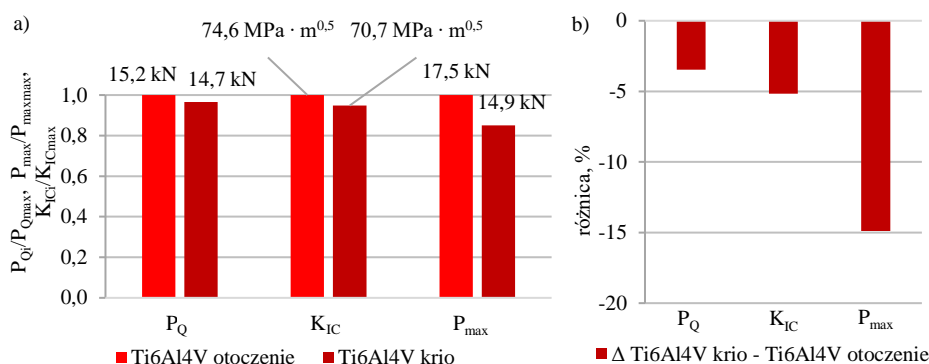
Otrzymane wyniki niekiedy spełniają wymogi normy ASTM E 399 dotyczące warunków jakie należy spełnić, aby wartość eksperymentalną  $K_Q$  można było traktować jako wartość krytyczną, jednak w przypadku badań wyłącznie w temperaturze otoczenia, należy skłaniać się do innego sposobu opisu (innej miary) odporności materiału na pękanie.

## 9.2 Tytan Ti6Al4V

Podobnie jak w przypadku stopu aluminium w tabeli 5 zestawiono wyniki badań odporności na pękanie stopu tytanu Ti6Al4V w identycznej konfiguracji jak poprzednio. Graficzne przedstawienie wyników znajduje się na rysunku 13.

Tabela 5. Zestawienie uśrednionych wyników badań odporności na pękanie metodą maksymalnej eksperymentalnej wartości współczynnika intensywności naprężeń dla stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i kriogenicznych

oznaczenie	$\overline{P_Q}$	$\overline{K_Q}$	$\overline{P_{max}}$	$\overline{K_{IC}}$	$\overline{P_{max}} / \overline{P_Q}$
	kN	MPa·m <sup>0,5</sup>	kN	MPa·m <sup>0,5</sup>	N/N
Ti6Al4V otoczenie	15,23	74,58	17,46	74,58	1,14
Ti6Al4V krio	14,70	70,73	14,86	70,73	1,01
porównywane materiały	różnica, $\Delta X = (X_{77K} - X_{298K}) / X_{298K}$ , %, gdzie X: P <sub>Q</sub> , K <sub>Q</sub> , K <sub>IC</sub> , P <sub>max</sub>				
różnica %	$\Delta P_Q$	$\Delta K_Q$	$\Delta P_{max}$	$\Delta K_{IC}$	$\Delta P_{max}/P_Q$
	-3,5	-5,2	-14,9	-5,2	-11,4



Rys.8.13. Porównanie uśrednionych wyników badań, odporności na pękanie metodą współczynnika intensywności naprężeń, a) normalizowane do jedynki wybrane własności materiałowe, b) różnice procentowe pomiędzy wyznaczonymi wartościami

Biorąc pod uwagę wszystkie otrzymane wyniki, to w warunkach kriogenicznych, każda z wyznaczonych wartości spada. Największa zmiana wystąpiła przy wartości siły  $P_{max}$ , ponieważ przy obniżonych temperaturach spadła o 14,9 %. Naturalną konsekwencją tego jest zmniejszenie się wartości ilorazu  $P_{max}/P_Q$ , jednak w tym przypadku spadek nie był aż tak gwałtowny. Wartość wspomnianego ilorazu świadczy o tym, że badanie odporności na pękanie stopu tytanu za pomocą współczynnika intensywności naprężeń jest właściwe, szczególnie gdy weźmiemy pod uwagę warunki kriogeniczne. Opisane warunki, spowodowały ponad 5 % spadek odporności na kruche pękanie opisywanego stopu.

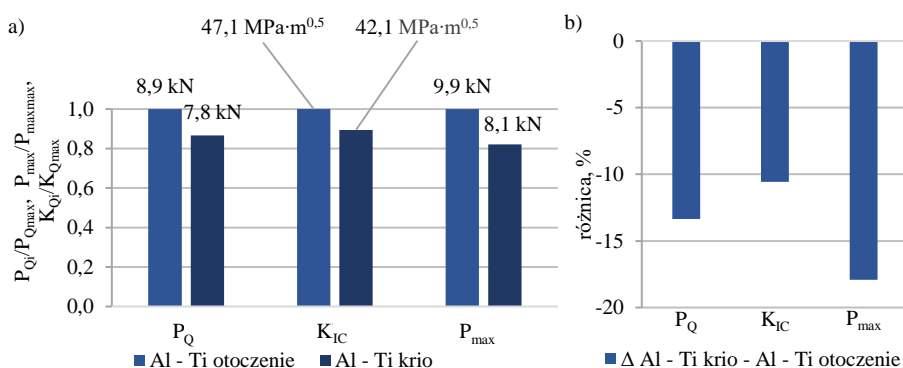
Niewielka wartość stosunku  $P_{max}/P_Q$  oraz sam charakter przebiegu krzywej podczas wyznaczania odporności na pękanie, zdecydowały o uznaniu parametru  $K_Q$  za odporność na pękanie stopu tytanu Ti6Al4V w zakresie liniowo – sprężystym  $K_{IC}$ .

## 9.3. Materiał warstwowy Al – Ti

Kluczowym z punktu widzenia niniejszej pracy, jest wyznaczenie oraz analiza odporności na pękanie materiału warstwowego, powstałego wskutek zgrzewania wybuchowego wcześniej zanalizowanych materiałów. W tabeli 6 zestawiono porównanie procentowe wyników badań odporności na kruche pękanie materiału warstwowego Al – Ti w warunkach 297K i 77K. Wybrane uśrednione wartości normalizowane do jedynki, wraz z procentowym porównaniem tych własności zaprezentowano na rysunku 14.

Tabela 6. Zestawienie uśrednionych wyników badań odporności na pękanie metodą współczynnika intensywności naprężeń, materiału warstwowego Al – Ti dla warunków otoczenia i kriogenicznych

oznaczenie	$\overline{P}_Q$	$\overline{K}_Q$	$\overline{P}_{max}$	$\overline{K}_{IC}$	$\overline{P}_{max} / \overline{P}_Q$
	kN	MPa·m <sup>0,5</sup>	kN	MPa·m <sup>0,5</sup>	N/N
Al - Ti otoczenie	8,98	47,08	9,88	47,08	1,10
Al - Ti krio	7,78	42,11	8,11	42,11	1,04
porównywane materiały	różnica, $\Delta X = (X_{77 K} - X_{298 K}) / X_{298 K}$ , %, gdzie X: P <sub>Q</sub> , K <sub>Q</sub> , K <sub>IC</sub> , P <sub>max</sub>				
różnica %	$\Delta P_Q$	$\Delta K_Q$	$\Delta P_{max}$	$\Delta K_{IC}$	$\Delta P_{max}/P_Q$
	-13,36	-10,56	-17,91	-10,56	-5,42



Rys.14. Porównanie uśrednionych wyników badań odporności na pękanie, metodą maksymalną eksperymentalną wartość współczynnika intensywności naprężeń, a) normalizowane do jedynki wybrane własności materiałowe, b) różnice procentowe pomiędzy wyznaczonymi wartościami

Podczas wyznaczania odporności pękanie materiału warstwowego, nastąpił spadek wartości wszystkich wykazanych cech. Największą zmianę zaobserwowano dla P<sub>max</sub> bowiem średnia wartość siły maksymalnej zarejestrowana podczas eksperymentu, spadła o 18%. Naturalnie wartość siły P<sub>Q</sub> również zmalała, ale o nieco mniejszą wartość wynoszącą średnio około 13,4 %. Wartość ilorazu P<sub>max</sub>/P<sub>Q</sub> w warunkach kriogenicznych uległa spadkowi o 5,4 % co świadczy o kruchym charakterze pękania. Należy zwrócić uwagę na niemal taką samą wartość siły maksymalnej oraz siły wyznaczanej konstrukcyjnie dla warunków kriogenicznych. Wartość ilorazu dla opisywanych warunków temperaturowych wynosi 1,04. Z punktu widzenia procedury badawczej, spełnia to jeden z warunków

Otrzymane wyniki badań materiału warstwowego są zdecydowanie bardziej zbliżone do wyników stopu aluminium, wliczając w to maksymalną wartość siły, uzyskaną podczas eksperymentu. Początkowo stwierdzono, że mogło to wynikać ze znacznych różnic w długości wstępnej pęknięcia zmęczeniowego, jednak po późniejszej weryfikacji przełomów próbek okazało się, że poprzez zastosowanie układu opisanego w rozdziale 5, uzyskano bardzo podobne wartości długości pęknięcia zmęczeniowego.

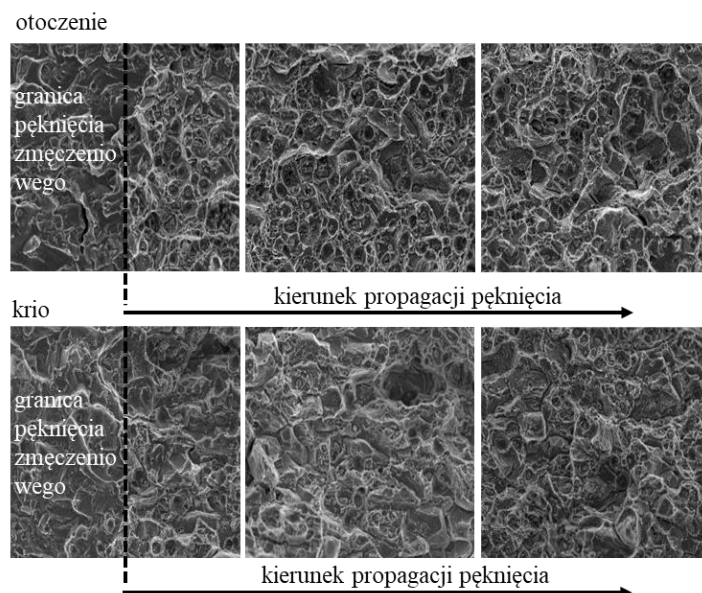
Sama wartość maksymalnego eksperymentalnego współczynnika intensywności naprężeń, jest niższa niż w przypadku stopu tytanu i wynosi odpowiednio 47,08 MPa·m<sup>0,5</sup> dla warunków otoczenia, oraz 42,11 MPa·m<sup>0,5</sup> dla warunków kriogenicznych. Oznacza to ponad 10 % spadek K<sub>Q</sub> wskutek działania obniżonych temperatur. Stop tytanu potraktowany jako materiał jednorodny, charakteryzuje się większą odpornością na kruche pękanie, jednak zastosowanie go, jako jednego z elementów składających się na materiał warstwowy nie powoduje proporcjonalnego wzrostu odporności na pękanie kompozytu, a ostatecznie przyjmuje on własności zbliżone do materiału o mniejszej odporności na pękanie.

Spadek wartości siły maksymalnej jaką zarejestrowano podczas monotonicznego rozciągania materiału warstwowego ze wstępną szczeliną zmęczeniową, odbywającego się w komorze klimatycznej wypełnionej ciekłym azotem, można wyjaśnić pojawieniem się naprężeń wewnętrznych, wynikających z różnego współczynnika rozszerzalności cieplnej. Efekt ten spotęgowany jest dodatkowo wzrostem kruchości materiałów analizowanej poprzez stosunek P<sub>max</sub>/P<sub>Q</sub>, spowodowanych niską temperaturą.

## 10. ANALIZA FRAKTOGRAFICZNA PRZEŁOMÓW

W celu określenia charakteru pęknięcia próbek CT, ich przełomy poddano analizie mikrostrukturalnej z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego.

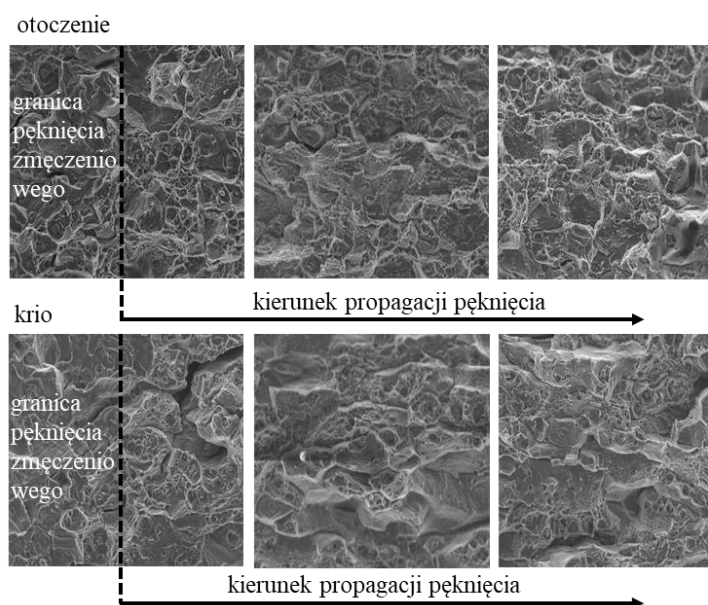
Należy zaznaczyć, że analizie poddano cały przełom próbki, jednak w pracy zamieszczono wyłącznie wybrane zdjęcia. Dobrano je tak, aby przedstawiały fragment w okolicy grzbietu, środkowej części oraz obszar tuż przy czole pęknięcia zmęczeniowego próbki. Porównanie przełomów próbek badanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych, wykonanych ze stopu aluminium AA2519 znajduje się na ilustracji 15.



Rys. 15. Porównanie przełomów próbek wykonanych z AA2519 badanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych

W wyniku analizy przełomów stwierdzono występowanie dwóch głównych mechanizmów pęknięcia stopu AA2519 w temperaturze otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Polegają one głównie na nukleacji, rozwoju i koalescencji mikropustek oraz pęknięciach międzykrystalicznych.

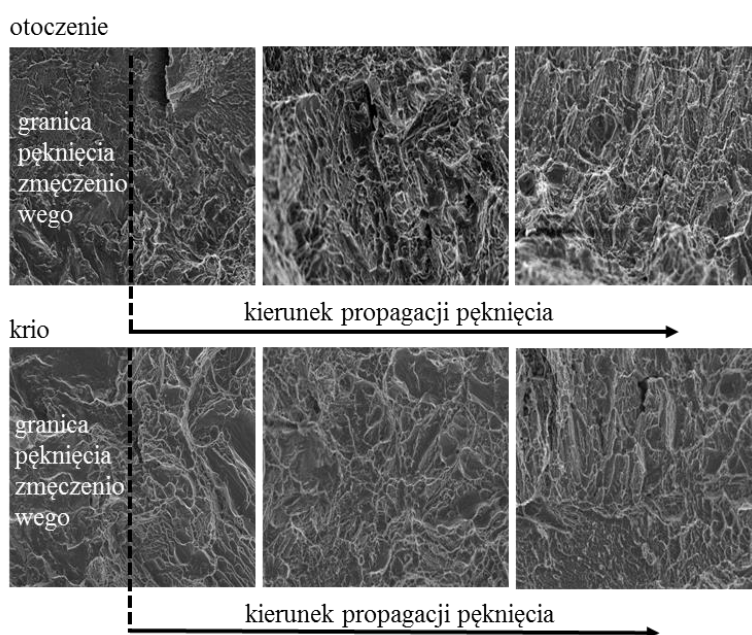
Takie samo porównanie, ale dla strony aluminiowej materiału warstwowego Al – Ti znajduje się na ilustracji 16.



Rys. 16. Porównanie przełomów próbek badanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych wykonanych z materiału warstwowego, ale od strony stopu aluminium AA2519

Charakter przełomu próbek wykonanych z analizowanego materiału bazowego oraz z materiału warstwowego Al – Ti są bardzo podobne. Sama tendencja zmian jakie zachodzą na przełomie począwszy od czoła pęknięcia zmęczeniowego a skończywszy na grzbiecie próbki, jest niemal taka sama. Jediną różnicą jaką zaobserwowano jest nieco mniejsza ilość pustek określanych w poprzednich akapitach jako największe na korzyść pustek średniej i najmniejszej wielkości. Zaobserwowano również większą ilość pęknięć na granicach ziaren.

Analizę faktograficzną przełomów próbek badanych w 297K i w 77K wykonano również dla stopu tytanu, oraz strony tytanowej materiału warstwowego. Tak więc wybrane zdjęcia przełomu Ti6Al4V będącego materiałem jednorodnym, badanego w obu wyróżnionych temperaturach przedstawiono na ilustracji 17.



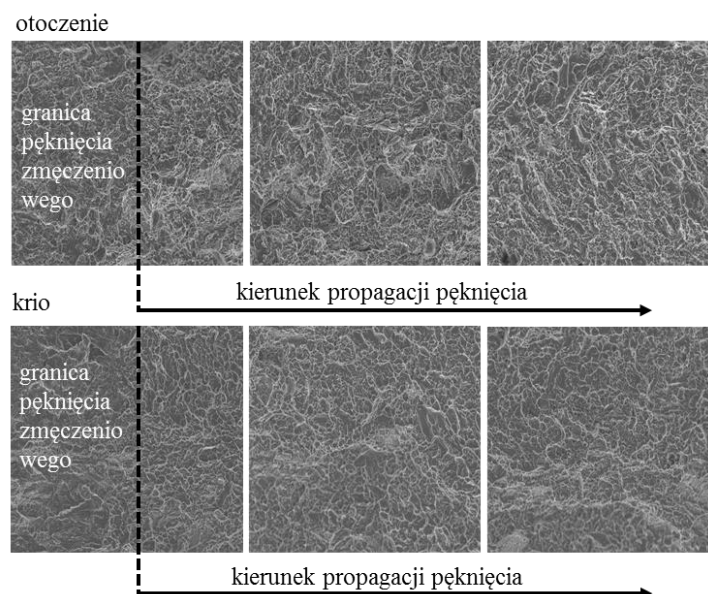
Rys. 17. Porównanie przełomów próbek wykonanych z Ti6Al4V badanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych

Charakter przełomów jest zbliżony na ich całej długości zarówno w przypadku badań w warunkach otoczenia, jak i w warunkach kriogenicznych.

Przełomy uzyskane w trakcie badań w warunkach otoczenia są bardziej zróżnicowane topograficznie. Najgwałtowniejszą różnicą w wysokości, są zagłębienia plastyczne będące efektem koalescencji mikro pustek, charakterystyczne dla dynamicznych prób rozciągania.

Do celów porównawczych na ilustracji 18 zestawiono wybrane fragmenty przedstawiające przełom próbki warstwowej, ale po stronie stopu tytanu. Zdjęcia dobrano zgodnie z kryterium opisanym we wcześniejszych akapitach.





Rys. 18. Porównanie przełomów próbek badanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych wykonanych z materiału warstwowego, ale od strony stopu tytanu Ti6Al4V

W analizowanym przypadku zarówno sam charakter przełomów jak i niewielkie różnice pomiędzy warunkami otoczenia i kriogenicznymi są podobne do tych, uzyskanych na próbkach wykonanych z materiału bazowego. Różnica natomiast dotyczy topografii, bowiem w materiale warstwowym jest ona mniej zróżnicowana i to w obu warunkach temperaturowych.

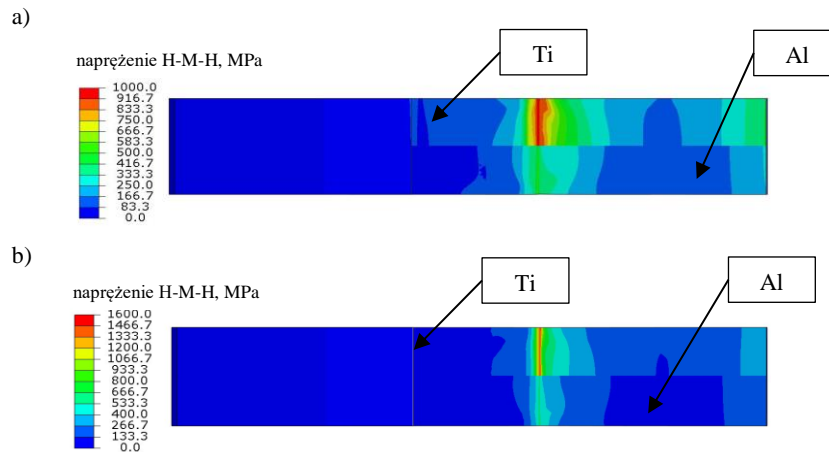
## 11. ANALIZA ROZKŁADÓW NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ WYZNACZONYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W BADANIACH WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA INTENSYWNOŚCI NAPRĘŻEŃ

W celu zobrazowania pól mechanicznych w otoczeniu pęknięcia, przeprowadzono ich analizę numeryczną z zastosowaniem modeli materiałowych wyznaczonych dla warunków otoczenia i warunków kriogenicznych. Postanowiono porównać ze sobą przede wszystkim rozkłady naprężeń wyznaczonych w badaniach próbek jednorodnych oraz próbek wykonanych z materiału warstwowego. Analizie poddano także wpływ warunków kriogenicznych na wspomniane rozkłady.

W obliczeniach zastosowano sprężysto – plastyczne modele materiałowe z umocnieniem izotropowym, opracowane na podstawie wykresów naprężeń rzeczywistych, wyznaczonych na bazie eksperymentalnych wykresów rozciągania.

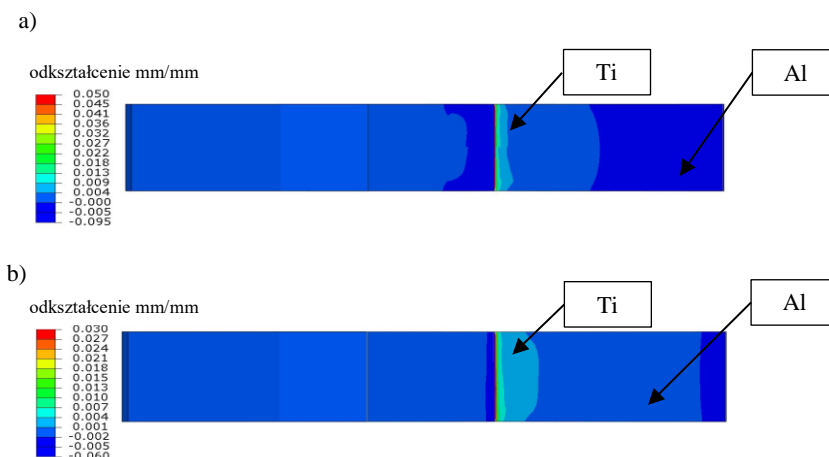
W analizie stosowano kryterium plastyczności Hubera – Misesa – Hencky’ego (HMH).

W modelu zastosowano trzy obszary zagęszczenia siatki podziału, przy czym najmniejsze z elementów były zorientowane w otoczeniu wierzchołka szczeliny. Należy zaznaczyć, że model był obciążany do uzyskania wartości siły odpowiadającej średniej eksperymentalnej wartości siły  $P_Q$  zgodnie z wynikami eksperymentu rzeczywistego. Przykładowe mapy przedstawiające wielkości pól naprężeń zredukowanych w płaszczyźnie pęknięcia próbki CT wykonanej z materiału warstwowego, dla obu warunków temperaturowych, zaprezentowano na rysunku 19. Natomiast przykładowe mapy reprezentujące pola odkształceń zaprezentowano na rysunku 20.



Rys. 19. Przykładowe mapy przedstawiające wielkości pól naprężeń zredukowanych (H-M-H) wyznaczone w płaszczyźnie pęknięcia, a) warunki otoczenia, b) warunki kriogeniczne

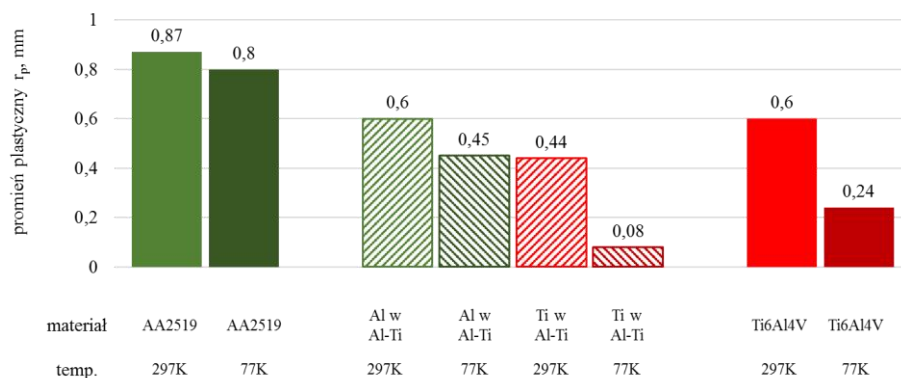
Na podstawie obliczeń numerycznych ustalono, że w warunkach otoczenia, wielkości pól naprężeń po stronie w której znajduje się stop tytanu, różnią się od tych będących po stronie stopu aluminium. Naprężenia po stronie tytanu mają większą wartość, dochodzącą do 1000 MPa. Podobną zależność zaobserwowano dla warunków kriogenicznych. Należy jednak zaznaczyć, że pomimo występowania większych naprężeń, to warunki kriogeniczne spowodowały zmniejszenie długości promieni plastycznych dla obu materiałów.



Rys. 20. Przykładowe mapy przedstawiające wielkości pól odkształceń wyznaczone w płaszczyźnie pęknięcia, a) warunki otoczenia, b) warunki kriogeniczne

Zmierzone odkształcenia zarówno po stronie stopu tytanu jak i po stronie stopu aluminium miały podobne wielkości w obrębie jednakowych warunków temperaturowych. Biorąc pod uwagę cały przekrój próbki zaobserwowano, że wielkości pól odkształceń dla obu zamodelowanych materiałów są mniejsze dla warunków kriogenicznych.

Najbardziej interesującą wielkością, wyznaczaną podczas analizy numerycznej z punktu widzenia analizy odporności na pęknięcie, jest wielkość promieni plastycznych mierzonych w płaszczyźnie pęknięcia. Wspomniany promień plastyczny jest rozumiany jako odległość pomiędzy wierzchołkiem szczeliny a punktem, w którym wyznaczone numerycznie naprężenia są większe, co najwyżej równe umownej granicy plastyczności, wyznaczonej dla każdego z materiałów dla określonych temperatur. Zestawienie wyników pomiaru wielkości promieni plastycznych dla wszystkich materiałów w obu warunkach temperaturowych znajduje się na ilustracji 21.



Rys. 21. Wielkości promieni plastycznych mierzonych w płaszczyźnie pęknięcia dla wszystkich analizowanych materiałów badanych w obu warunkach temperaturowych.

Na podstawie analizy wyników wynikających z eksperymentu numerycznego ustalono, że największy promień plastyczny występował dla stopu aluminium, najmniejszy zaś dla stopu tytanu. Zaobserwowano również dwa czynniki wpływające na zmniejszenie promieni plastycznych. Należą do nich oddziaływanie temperatur kriogenicznych oraz łączenie ze sobą materiałów bazowych w materiał warstwowy.

## 12. WNIOSKI Z BADAŃ

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy, zrealizowanie badań doświadczalnych oraz analiza otrzymanych na ich podstawie wyników pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących podstawowych zagadnień rozpatrywanych w pracy.

- Umieszczenie próbek materiałowych podczas badań w kąpeli z ciekłego azotu spowodowało wzrost umownej granicy plastyczności, doraźnej granicy wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości podłużnej badanych materiałów. W przypadku wydłużenia przy zerwaniu zaobserwowano spadek jego wartości dla materiału warstwowego i stopu tytanu, natomiast wzrost dla stopu aluminium AA2519. Otrzymane wyniki badań potwierdziły opisywany w literaturze wpływ warunków kriogenicznych na własności mechaniczne stopów aluminium i stopów tytanu.
- W przypadku maksymalnej wartości współczynnika intensywności naprężeń, odporność na pękanie materiału warstwowego Al – Ti nie była niższa, niż mniej odpornego na pękanie stopu aluminium AA2519. Natomiast w przypadku odporności na pękanie w zakresie sprężysto – plastycznym dla warunków otoczenia, stop AA2519 charakteryzuje się większą odpornością na pękanie.
- Warunki kriogeniczne spowodowały niewielki spadek odporności na kruche pękanie materiału warstwowego Al – Ti oraz stopu tytanu Ti6Al4V. Stop aluminium AA2519 w zakresie liniowo – sprężystym nie zareagował na opisywane warunki.
- Zróznicowana odporność na pękanie materiałów bazowych oraz znaczący wpływ warunków kriogenicznych na opisywaną cechę materiałową, powoduje znaczne trudności w dobraniu odpowiedniej miary odporności na pękanie.
- Analiza MES pól mechanicznych wokół wierzchołka pęknięcia potwierdziła spodziewane zróznicowanie rozkładów naprężeń w warstwach stopu aluminium i stopu tytanu. Zastosowanie różnych modeli materiałowych dla warunków otoczenia i warunków kriogenicznych umożliwiło porównanie stanu naprężeń, dla obciążeń krytycznych z punktu widzenia wyznaczania odporności na pękanie.

### **13. WNIOSKI DO DALSZYCH BADAŃ**

1. We wnioskach z badań, podkreślono złożony charakter pól naprężeń i odkształceń występujący w próbkach CT materiału warstwowego. W związku z tym istotnym wydaje się porównanie pól mechanicznych wyznaczonych za pomocą metody elementów skończonych z tymi wyznaczonymi doświadczalnie np. za pomocą cyfrowej korelacji obrazu. Wyniki doświadczalne pozwoliłyby na zweryfikowanie metody numerycznej oraz najprawdopodobniej wskazały by kierunek dalszego rozwoju modelowania własności mechanicznych materiałów warstwowych.
2. Brak bezpośredniego związku odporności na pękanie materiałów bazowych i materiału warstwowego wskazuje na potrzebę opracowanie nowej lub rozszerzenie już istniejących metod wyznaczania odporności na pękanie materiału warstwowego na bazie własności materiałów bazowych z zastosowaniem innych wielkości krytycznych, w tym stanu odkształceń i naprężeń w strefie pęknięcia.
3. Materiały konstrukcyjne przeznaczone na zastosowania lotnicze i kosmiczne w niektórych przypadkach mogą być narażone na oddziaływanie podwyższonych temperatur, wywołanych tarcieniem o powietrze w atmosferze. Z tego względu celową wydaje się być analiza własności mechanicznych badanego materiału warstwowego także w podwyższonych temperaturach.
4. Naturalną kontynuacją badań własności mechanicznych materiału warstwowego Al - Ti będą badania własności zmęczeniowych oraz analiza możliwości przewidywania trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem dostępnych metod obliczeniowych.
5. Zaobserwowana delaminacja wskazuje na potrzebę przeprowadzenia dalszych badań, celem poznania jej wpływu na odporność na pękanie.