



Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V

Maciej Kotyk¹, Radosław Stachowiak^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Piotr Swacha⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

Streszczenie: Cel badania to wyznaczenie krytycznej wartości rozwarcia wierzchołka pęknięcia *CTOD* na podstawie przeprowadzonego badania laboratoryjnego dla stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych oraz określenie wpływu temperatury na własności badanego stopu. W celu wyznaczenia *CTOD* dla stopu tytanu wykonano znormalizowane próbki CT. Badanie składało się z dwóch etapów. Pierwszy z nich polegał na wygenerowaniu pęknięcia zmęczeniowego poprzecznie do linii działania siły. Drugi, główny etap badań, polegał na poddaniu próbek monotonicznej próbie rozciągania w dwóch różnych warunkach temperaturowych. W pracy zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań oraz dokonano analizy wybranych wielkości mechanicznych związanych z eksperymentem. Na podstawie przeprowadzonej analizy zauważono, że temperatura wpływa na wartość *CTOD* wyznaczonego dla danego stopu. W warunkach kriogenicznych stop Ti6Al4V charakteryzuje się znacznie niższą wartością *CTOD*. Przeprowadzone badania stanowią bazę wyników i informacji, która jest punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy wybranych charakterystyk mechanicznych materiału warstwowego AA2519-AA1050-Ti6Al4V, w tym jego wartości *CTOD* w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych.

Słowa kluczowe: *CTOD*, *RWP*, pękanie zmęczeniowe, wpływ warunków otoczenia, tytan, stopy tytanu

Influence of cryogenic conditions on the critical crack tip opening displacement of Ti6Al4V titanium alloy

Maciej Kotyk¹, Radosław Stachowiak^{2*}, Wojciech Ziólkowski³, Piotr Swacha⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

Summary: The aim of the study was to determine the critical value of the crack tip *CTOD*, based on the laboratory test, for the Ti6Al4V titanium alloy under ambient and cryogenic conditions, and to determine the influence of temperature on the properties of the tested alloy. In order to determine the *CTOD* for the titanium alloy, standardized CT samples were made. The study consisted of two stages. The first consisted in generating a fatigue crack transversely to the line of action of the force. The second, main stage of the tests was to subject the samples to a monotonic tensile test under two different temperature conditions. The paper presents the results of the research carried out and the analysis of selected mechanical quantities related to the experiment. On the basis of the analysis, it was noticed that the temperature influences the *CTOD* value determined for a given alloy. Under cryogenic conditions, the Ti6Al4V alloy has a much lower *CTOD* value. The conducted tests constitute the basis of the results and information, which is the starting point for the analysis of selected mechanical characteristics of the AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material, including its *CTOD* values in ambient and cryogenic conditions.

Key words: *CTOD*, *RWP*, fatigue cracking, influence of environmental conditions, titanium, titanium alloys

1. Wstęp

Nieustanny rozwój inżynierii materiałowej prowadzi do powstawania nowych materiałów, których własności mechaniczne w wyniku udoskonalania składu chemicznego są coraz lepsze. Materiały te mają zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle lotniczym [9]. Z uwagi na szerokie zastosowanie nowych materiałów inżynierskich istnieje potrzeba prowadzenia badań w celu dostarczania aktualnych danych na temat ich własności mechanicznych. Na podstawie odpowiedniej analizy wyników badań można poznać mechanizm zniszczenia elementów konstrukcyjnych wykonanych z opisywanych materiałów. Na skutek pojawiania się i propagacji pęknięć zmęczeniowych dochodziło do zniszczeń m.in. konstrukcji mostów [23].

Opracowano różne metody badania odporności na pękanie materiałów, m. in. takie jak krytyczna wartość całki J (J_c), krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń (K_c), lub krytyczna wartość współczynnika uwalniania energii (G_c). Inną miarą, która również charakteryzuje odporność materiału na pękanie jest krytyczna wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia – *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*), dająca mniej informacji o materiale, jednak bardziej uniwersalna. Opisywana wielkość może być wykorzystywana do porównywania między sobą wybranych charakterystyk mechanicznych materiałów [18, 27].

Badania polegające na wyznaczeniu *CTOD* były już przeprowadzane dla zróżnicowanej grupy materiałów [11, 23, 32], lecz z uwagi na ciągły rozwój inżynierii materiałowej istnieje stała potrzeba ich realizacji – mają dostarczać nowych i aktualnych wyników. Dla materiału Ti6Al4V były przeprowadzane badania *CTOD* [13], lecz ze względu na istotną w kontekście techniki pomiarowej przestrzeń czasową dostrzeżono potrzebę powtórnego przeprowadzenia opisywanych badań. Dodatkowo w ogólnodostępnych źródłach nie odnaleziono informacji na temat badań tego materiału w warunkach kriogenicznych. W wyniku przeprowadzonej analizy literatury oraz z powodu braku aktualnych danych odnośnie badań *CTOD* dla stopu Ti6Al4V postanowiono je przeprowadzić. Założono również, że badania zostaną wykonane w warunkach otoczenia (293 K) i kriogenicznych (77 K). W celu przeprowadzenia badań posłużono się normą BS 7448 [8]. Istnieje także norma ASTM E1290, która jest pochodną normy BS 7448, jednak w tym opracowaniu postanowiono bazować na normie brytyjskiej [30].

2. Metodyka badań

2.1. Obiekt badań

Obiektem badań był szeroko stosowany zarówno w obiektach technicznych, jak i w implantologii stop tytanu Ti6Al4V (grade 5). Materiał ten charakteryzuje się dobrą plastycznością na gorąco oraz dobrą spawalnością. Jest on odporny na czynniki korozyjne. Wspomniana popularność tego materiału wynika również z mniejszego – w porównaniu ze stalą – stosunku gęstości do wytrzymałości. Przyczyną tak korzystnej własności mechanicznej jest struktura krystaliczna tego materiału składająca się z gruboziarnistej fazy α oraz występującej na granicach ziaren przesyconej

glinem i wanadem fazy β . Ma to jednak odzwierciedlenie w cenie grade 5. Stop Ti6Al4V charakteryzuje się wyższą ceną w porównaniu ze stalą o tej samej wytrzymałości na rozciąganie.

Bardzo korzystną cechą tego materiału jest wysoka biogodność, rozumiana jako odporność na korozję mogącą powstać wskutek oddziaływania substancji fizjologicznych [7, 15, 19]. Powoduje to, że omawiany materiał z powodzeniem jest stosowany również w stomatologii [16]. Wymaga on jednak odpowiedniego przygotowania ze względu na wanad, który wchodzi w skład chemiczny opisywanego stopu. Jego udział procentowy w Ti6Al4V wraz z udziałem innych pierwiastków przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego materiału Ti6Al4V [33]

Table 1. Chemical composition of the titanium alloy Ti6Al4V [33]

Al	V	Fe	Si	O	C	N	H
6,42	4,12	0,18	0,024	0,12	0,013	0,011	0,004

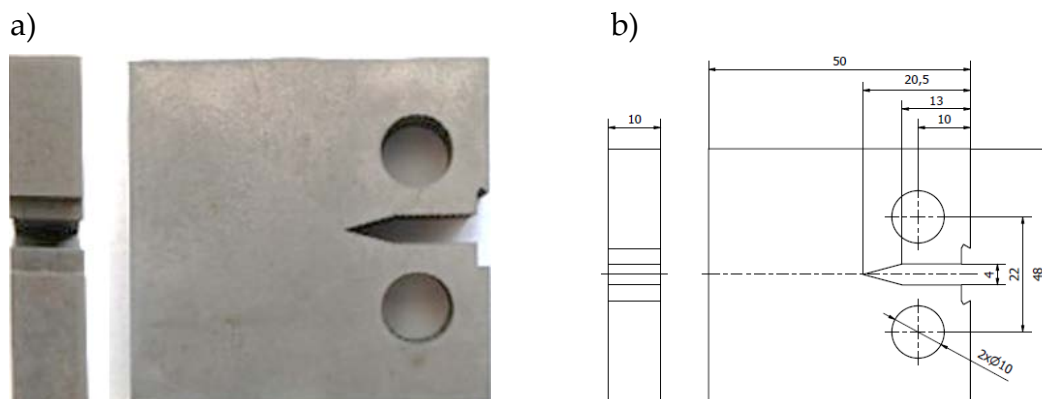
Materiał Ti6Al4V jest szeroko opisywany w literaturze [10]. Podczas analizy dostępnych źródeł można napotkać informacje o stosowaniu tego materiału w konstrukcjach lotniczych – np. do budowy elementów mocowania kół lub okien statków powietrznych. Wykorzystuje się go także w silnikach lotniczych, do budowy łopat turbin niskiego ciśnienia oraz rur układu wydechowego [14, 26, 34].

Bardzo szerokie stosowanie analizowanego materiału w konstrukcjach, których użytkowanie wiąże się z dużą odpowiedzialnością, wymaga identyfikacji własności tego materiału, w tym własności mechanicznych. W ogólnodostępnej literaturze można odnaleźć prace zawierające wyniki badań podstawowych własności statycznych Ti6Al4V [12, 17, 25] oraz wyniki bardziej czasochłonnnych badań trwałości zmęczeniowej [6, 24, 31]. Zaobserwować można również wzrost zainteresowania tym materiałem w kontekście mechaniki eksperymentalnej ciała stałego. Efekt ten zaobserwowano po pojawieniu się eksperymentalnego materiału zgrzewanego wybuchowo, złożonego z warstw materiałów AA2519-AA1050-Ti6Al4V, spośród których AA2519 oraz Ti6Al4V stanowią materiały bazowe, a stop AA1050 jest – jak określają autorzy publikacji – warstwą buforową [1, 2, 5, 21, 28, 29]. W literaturze można odnaleźć również informacje na temat badań odporności na pękanie tego materiału [20], jednak w żadnej z przedstawionych publikacji nie znaleziono informacji na temat krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia *CTOD* w kontekście charakterystyki mechanicznej, dającej informację o odporności na pękanie tego materiału.

2.2. Procedura badawcza

W celu wyznaczenia krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia *CTOD* dla stopu tytanu Ti6Al4V postanowiono zastosować próbki płaskie kompaktowe typu CT. Zdecydowano się na takie próbki ze względu na perspektywę dalszych badań nad wspomnianym materiałem warstwowym Al-Ti, jednak nie omówiono ich szerzej w prezentowanej pracy. Ze względu na wyjściową grubość blachy wynoszącą 10 mm

konieczne okazało się zastosowanie stosunku wymiarów charakterystycznych próbki $W/B = 4$, gdzie W – szerokość efektywna próbki CT i B – grubość próbki CT. Widok próbki oraz pozostałe wymiary geometryczne próbki zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Próbkę zwartą (CT) wykorzystaną podczas badań: a) widok próbki, b) wybrane wymiary próbki [opracowanie własne]

Fig. 1. Compact tension specimen: a) view of the specimen, b) selected specimen dimensions [own study]

Kluczowym elementem podczas wyznaczania odporności na pęknięcie zarówno za pomocą krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia, jak i innych miar odporności na pęknięcie – jak krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń bądź krytyczna wartość całki J – jest karb mechaniczny. Aby pęknięcie propagowało w kierunku prostopadłym do linii działania siły obciążającej próbkę, należy wykonać je w taki sposób, żeby promień zaokrąglenia dna karbu był możliwie najmniejszy. Opisany karb w badanych próbkach (rys. 1) wykonano z wykorzystaniem metod elektroerozyjnych. Po dokonaniu pomiarów zaokrąglenia dna karbu, wykonanych za pomocą metod optycznych, okazało się, że jego promień nie przekracza 0,32 mm. Należy zaznaczyć, że w żadnej z badanych próbek kąt pomiędzy przewidywaną a rzeczywistą płaszczyzną pęknięcia nie przekroczył 5° .

W celu przeprowadzenia zasadniczej części badań wykorzystano hydrauliczną maszynę wytrzymałościową marki Instron. Urządzenie zostało skonfigurowane w taki sposób, aby równolegle zapisywać dane z kanału pomiarowego siły, przemieszczenia tłoka roboczego maszyny oraz kanału odkształcenia (rozwarcia pęknięcia). Należy zaznaczyć, że w przypadku generowania pęknięcia zmęczeniowego maszyną wytrzymałościową sterowano z wykorzystaniem kanału siły, natomiast w przypadku monotonicznego obciążania próbki z pęknięciem zmęczeniowym sterowanie maszyną odbywało się za pomocą kanału przemieszczenia.

Ze względu na specyfikę badania próbki obciążane były w maszynie za pomocą układu trzpieniowo-sworzniowego w taki sposób, aby możliwy był obrót próbki wskutek stopniowego zwiększania się rozwarcia i długości pęknięcia.

Badania składały się z dwóch etapów. Pierwszy z nich polegał na wygenerowaniu pęknięcia zmęczeniowego poprzecznie do linii działania siły (obciążenia). Proces ten wiązał się z ryzykiem uszkodzenia próbki, więc należało wprowadzić procedury pole-

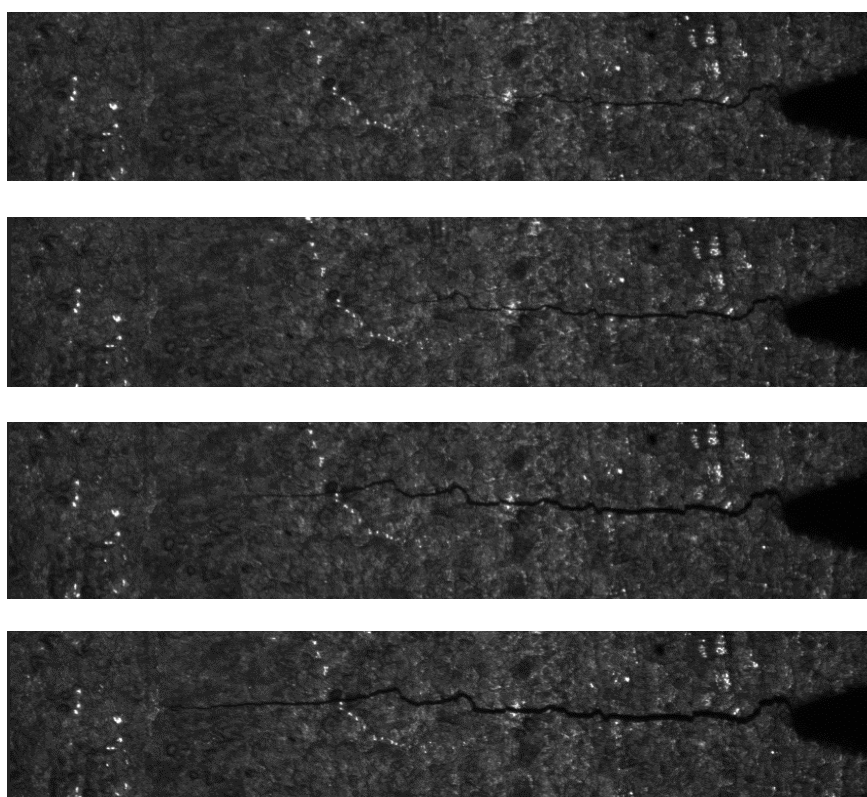
gające na odpowiednim jej zabezpieczeniu. Zdecydowano się na zastosowanie optoelektronicznego układu, który w sposób zautomatyzowany kontrolował przyrost pęknięcia, a w przypadku osiągnięcia pożądanej długości wspomnianego pęknięcia zatrzymywał pracę maszyny przy jednoczesnym odciążeniu próbki. Szczegóły dotyczące opisywanego układu można odnaleźć w artykułach [3, 4, 20–22]. Należy jednak zaznaczyć, że opisywana metoda polegała na analizie obrazu próbki za pomocą algorytmów bazujących na cyfrowej korelacji obrazu. Dodatkowe zabezpieczenie stanowiło również stałe monitorowanie rozwarcia pęknięcia mierzone w zamku próbki.

Wielkości opisujące sposób, w jaki obciążano próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego, zaprezentowano w tabeli 2. Należy zaznaczyć, że próbki były obciążane w sposób odzerowo tętniący. Wybrane fotografie przedstawiające przyrost pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas pierwszego etapu badań zaprezentowano natomiast na rysunku 2.

Tabela 2. Wybrane cechy charakteryzujące sposób obciążania próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

Table 2. Selected features characterizing the loading of the specimen during fatigue crack generation [own study]

Material	Częstotliwość Hz	Obciążenie kN
Ti6Al4V	5	5,8



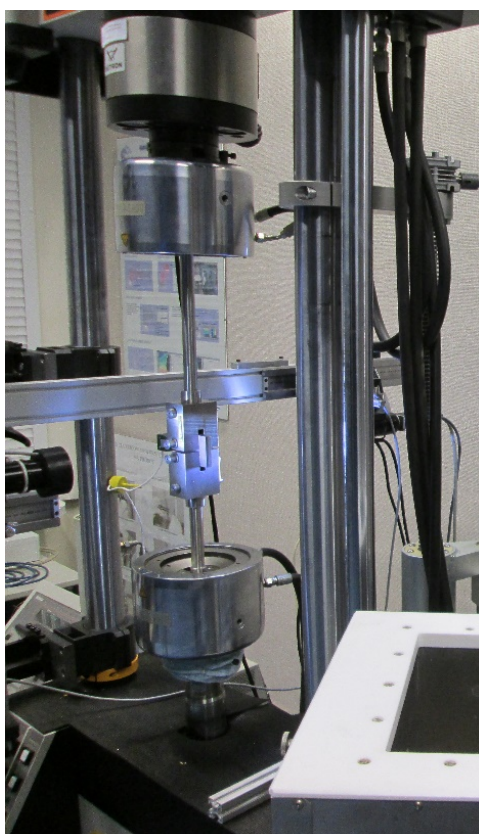
Rys. 2. Wybrane etapy wzrostu pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego w próbce CT z materiału Ti6Al4V [opracowanie własne]

Fig. 2. Selected fatigue crack growth phases recorded during fatigue crack generation in CT specimen made of Ti6Al4V [own study]

Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V

Należy zaznaczyć, że szybkość pęknięcia poszczególnych próbek była zróżnicowana i trudno jednoznacznie określić liczbę cykli potrzebnych do uzyskania zakładanej długości pęknięcia. Różnice w liczbie cykli stwierdzono przy samym zapoczątkowaniu pęknięcia, natomiast po jego zainicjowaniu różnice pomiędzy wydłużeniem pęknięcia a liczbą cykli nie były aż tak duże.

Próbkę zamocowaną w maszynie pomiarowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Próbkę zamocowaną na maszynie wytrzymałościowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

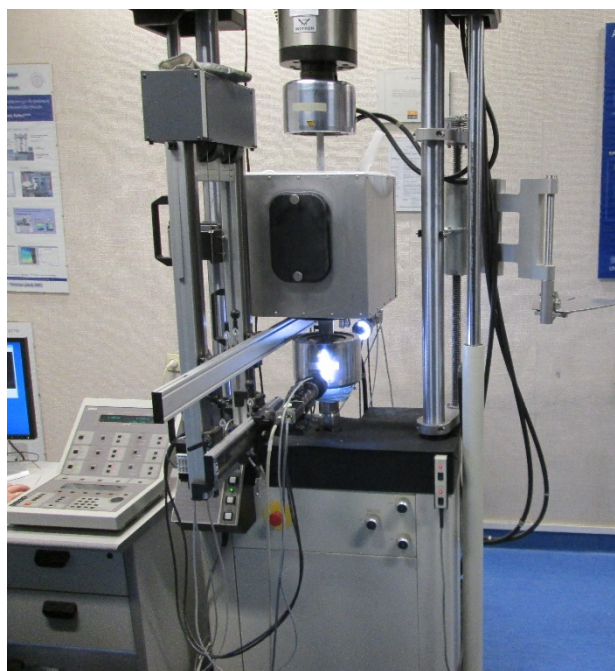
Fig. 3. Specimen mounted on a testing machine during fatigue crack generation [own study]

Drugi etap eksperymentu, który stanowił jego podstawową część, odbywał się w zależności od potrzeb w dwóch różnych warunkach temperaturowych, tj. w temperaturze otoczenia i w temperaturze kriogenicznej (77 K).

Próbki niezależnie od warunków obciążano w ten sam sposób, sterując przemieszczeniem tłoka maszyny pomiarowej (i tym samym całej komory) względem nieruchomego trawersu. Prędkość przesuwu była stała i wynosiła 0,05 mm/s. Podczas eksperymentu rejestrowano i zapisywano równoległe odczyty z trzech kanałów pomiarowych, tj. z kanału siły, przemieszczenia i rozwarcia pęknięcia. Zebrane w ten sposób dane pomiarowe pozwoliły na wyznaczenie przebiegów i ostatecznie na określenie krytycznego rozwarcia pęknięcia badanego materiału w obydwu warunkach temperaturowych.

Jak już wcześniej wspomniano, badania w obniżonej temperaturze wymagały zastosowania wcześniej przygotowanej komory środowiskowej wykonanej z materiału odpornego na utlenianie i korozję oraz z elementów termoizolacyjnych. Należy zaznaczyć, że przez cały czas trwania eksperymentu wewnątrz komory było wypełnione ciekłym azotem. Aby mieć pewność, że temperatura we wnętrzu komory jest jednokowa, we wszystkich badaniach po zalaniu komory oczekiwano, aż gwałtowne odparowywanie ciekłego azotu ustanie. Dopiero wówczas rozpoczynano pomiar.

Widok komory środowiskowej z zamocowaną w jej wnętrzu próbką zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Stanowisko badawcze z zamocowaną komorą środowiskową [opracowanie własne]

Fig. 4. Test stand with environmental chamber mounted [own study]

Elementem procedury badawczej, na który zwrócono szczególną uwagę, było stałe uzupełnianie ciekłego azotu w komorze, bowiem ten gwałtownie odparowywał. Efekt odparowywania był szczególnie widoczny podczas wymiany próbki, gdy do wnętrza komory wprowadzano materiał o temperaturze znacznie wyższej w porównaniu z warunkami wnętrza komory.

3. Wyniki

Na podstawie przeprowadzonego badania określono wartość *CTOD* dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i warunkach kriogenicznych. Aby dokonać pełniejszej analizy odporności na pęknięcie, postanowiono poddać ocenie również inne wielkości charakteryzujące tę cechę materiałową. Jedną z nich jest maksymalna siła zarejestrowana podczas badania (P_{max}). Kolejnymi wielkościami są: wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym (V_p), wartość siły przy początku kruchości pęknięcia (F_c) oraz spadek wartości siły przy stałym przemieszczeniu

($d1\%F1$). Określono również wpływu temperatury na przebieg charakterystyki CTOD.

Na podstawie uzyskanych wyników badań dokonano analizy wyników eksperymentu, posługując się normą BS 7448. Wykorzystano zawarte w niej zależności matematyczne, m.in. δ , utożsamianą z CTOD, którą opisano za pomocą poniższego wzoru:

$$\delta = \left[\frac{F}{B \cdot W^{0.5}} \times f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \cdot \frac{1-\nu^2}{2 \cdot R_{p0.2} \cdot E} + \frac{0,46 \cdot (W-a_0) \cdot V_P}{0,46 \cdot W + 0,54 \cdot a_0 + (C-W) + z} \quad (1)$$

gdzie:

- B – grubość próbki CT,
- C – szerokość całkowita próbki CT,
- W – szerokość efektywna próbki CT,
- ν – liczba Poissona ($0,3 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$),
- $R_{p0.2}$ – umowna granica plastyczności (1344,2 MPa),
- E – moduł Younga (128600 MPa),
- a_0 – długość szczeliny początkowej,
- V_P – wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym,
- F – siła,
- z – odległość między punktem zamocowania ekstensometru a powierzchnią próbki prostopadłą do płaszczyzny pęknięcia od strony karbu.

W tabeli 3 przedstawiono wybrane wyniki badań i obliczeń, uzyskane podczas przeprowadzonej próby badawczej.

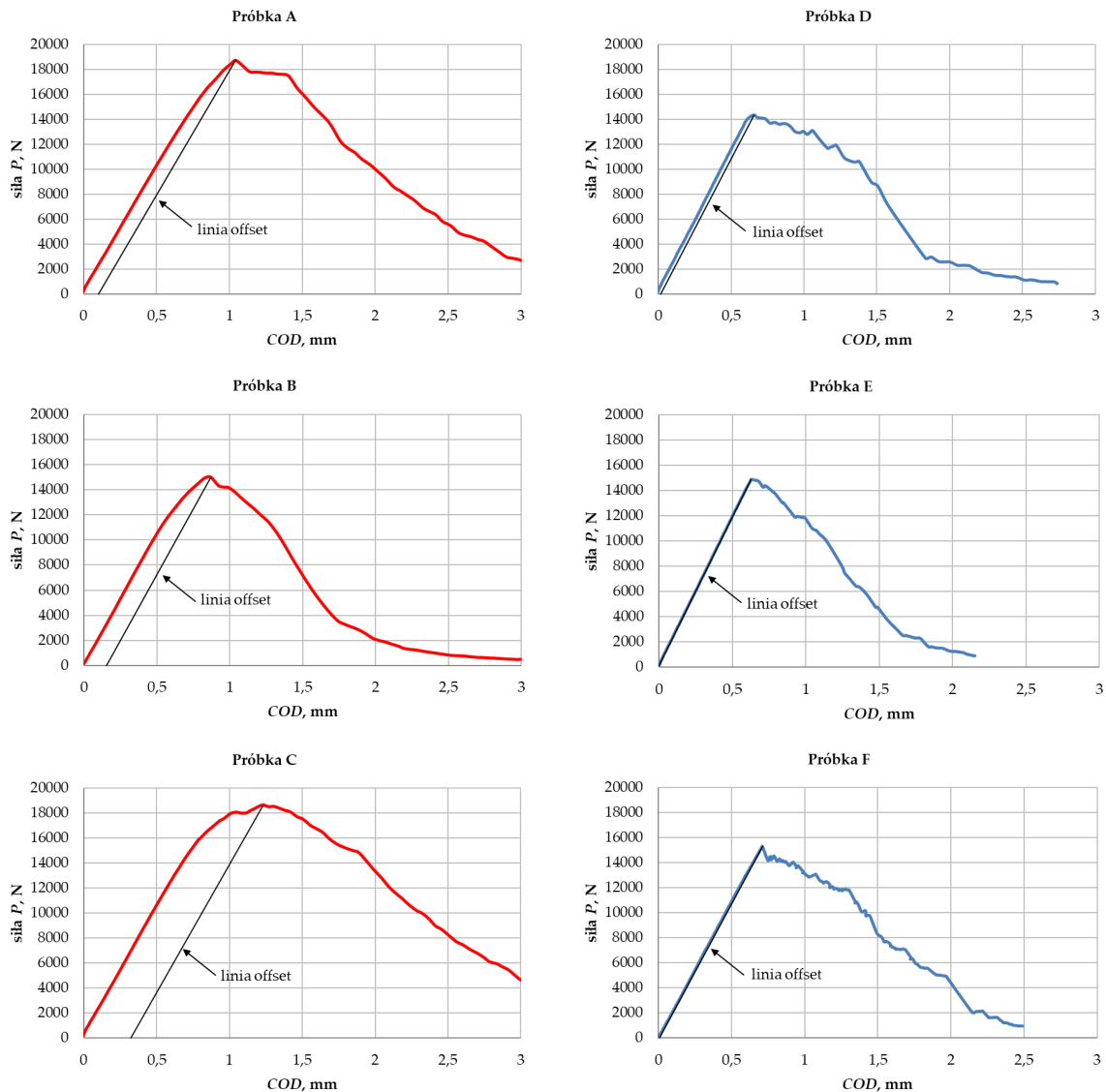
Tabela 3. Wybrane wyniki badań i obliczeń [opracowanie własne]

Table 3. Selected test results and calculations [own study]

Lp.	$P_{MAX}, \text{ N}$		$V_P, \text{ mm}$		$F_C, \text{ N}$		$d1\%F1, \%$		$\delta, \text{ mm}$		
	temp.	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K
1		18728	14344	0,104	0,018	18727	14344	29,783	18,521	0,425	0,137
2		14977	14887	0,151	-0,007	14976	14887	15,420	15,065	0,295	0,121
3		18663	15338	0,322	0,010	18663	15338	4,848	12,145	0,478	0,157
wartość średnia		17456	14856	0,192	0,007	17455	14856	16,684	15,244	0,399	0,138
odchylenie standar- dowe		2147	498	0,115	0,013	2147	498	12,516	3,192	0,094	0,018

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi siła – COD wyznaczone dla wszystkich badanych próbek w obu warunkach temperaturowych podczas badań eksperymentalnych. Kolorem czerwonym oznaczono przebiegi dla próbek badanych w warunkach otoczenia, natomiast kolorem niebieskim – przebiegi dla próbek badanych w warunkach kriogenicznych. Na wykresach zaznaczono linię offset – równoległą

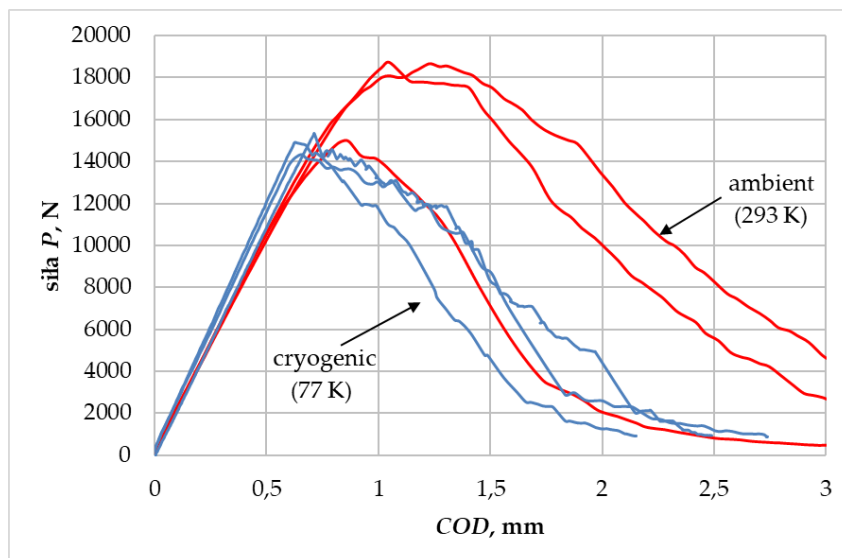
do liniowej części przebiegu siła – COD, co pozwoliło na wyznaczenie wartości siły F_c , której użyto w dalszych obliczeniach.



Rys. 5. Przebiegi COD w warunkach otoczenia (próbki A, B, C) i kriogenicznych w warunkach (próbki D, E, F) dla stopu Ti6Al4V [opracowanie własne]
Fig. 5. COD waveforms in ambient (specimens A, B, C) and cryogenic (specimens D, E, F) conditions for the alloy Ti6Al4V [own study]

Na rysunku 6 przedstawiono zestawienie wyników badań (przebiegów siła – COD) w formie graficznej – zaprezentowano 3 przebiegi dla próbek badanych w warunkach otoczenia (kolor czerwony) i 3 przebiegi dla próbek badanych w warunkach kriogenicznych (kolor niebieski). Każdy przebieg charakteryzuje jedną z badanych próbek. Na poniższym wykresie można zauważyć, jak warunki kriogeniczne wpłynęły na wartość siły P w porównaniu z warunkami otoczenia.

Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V

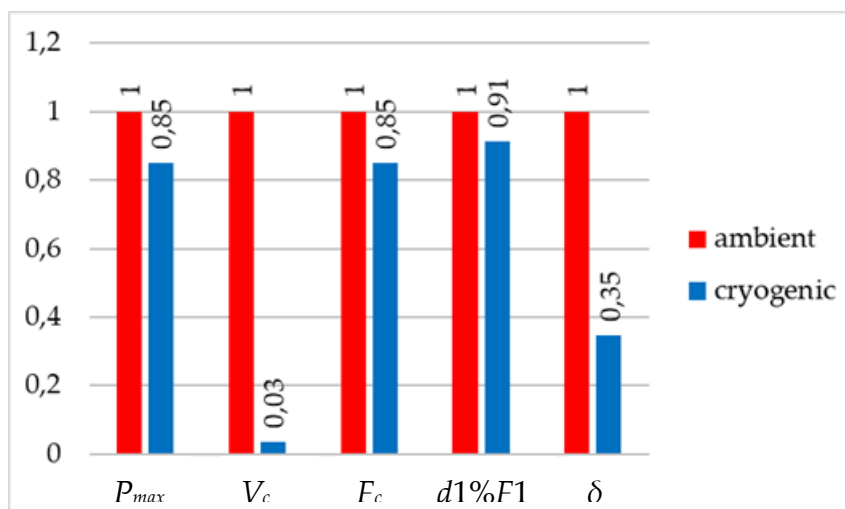


Rys. 6. Porównanie przebiegów siła-COD dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych [opracowanie własne]

Fig. 6. Comparison of force-COD curves for the Ti6Al4V alloy in ambient and cryogenic conditions [own study]

4. Analiza wyników badań

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie uśrednionych wartości charakterystyk mechanicznych uzyskanych podczas badania CTOD dla stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Wybrane wartości parametrów zostały znormalizowane do 1. Na poniższej ilustracji wielkość P_{max} stanowi jedynie uzupełnienie wyników badań z uwagi na jej zależność od wstępnej długości pęknięcia zmęczeniowego.



Rys. 7. Porównanie wybranych wielkości charakteryzujących odporność na pękanie wyrażoną przez CTOD wyznaczonych dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych [opracowanie własne]

Fig. 7. Comparison of selected values characterizing the fracture toughness expressed by CTOD determined for the Ti6Al4V alloy in ambient and cryogenic conditions [own study]

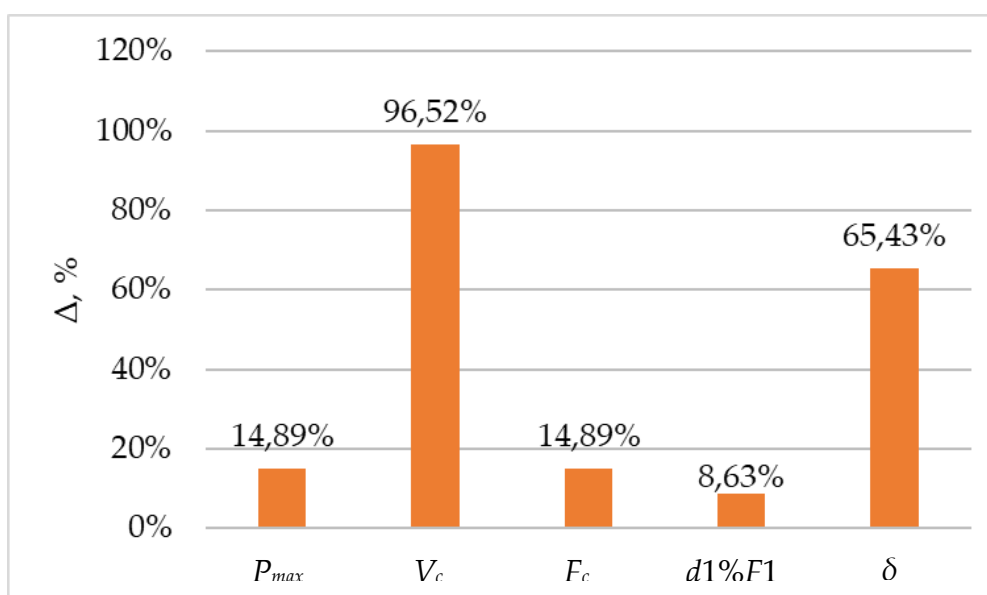
Na rysunku 8 przedstawiono procentowy wpływ warunków kriogenicznych na własności materiałowe. Wartości wskazane na rysunku 8 obliczono według poniższego wzoru:

$$\Delta_{\%} = \frac{X_A - X_C}{X_A} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

X_A – wartości parametrów dla stopu Ti6Al4V w warunkach otoczenia,

X_C – wartości parametrów dla stopu Ti6Al4V w warunkach kriogenicznych.



Rys. 8. Wpływ warunków kriogenicznych na wybrane wielkości charakteryzujące odporność na pękanie stopu Ti6Al4V [opracowanie własne]

Fig. 8. The percentage effect of cryogenic conditions on the selected properties of the alloy Ti6Al4V [own study]

W konsekwencji przeprowadzonej analizy wyników badań stwierdzono, że warunki kriogeniczne wpłynęły na badane wielkości mechaniczne charakteryzujące odporność stopu Ti6Al4V na pękanie. Największą różnicę w badanych cechach wyznaczono dla plastycznej części rozwarcia pęknięcia V_p , która w warunkach otoczenia była niemal dwukrotnie większa. W przypadku gdy połączy się to z ponad 65% większą wartością krytycznego rozwarcia pęknięcia δ , można stwierdzić, że warunki kriogeniczne spowodowały spadek odporności na pękanie dla materiału Ti6Al4V i tym samym – wzrost jego kruchości. Pozostałe wyznaczone wielkości mechaniczne również zmieniły się w warunkach kriogenicznych, lecz w porównaniu z wyżej opisanymi parametrami zmiana ta była stosunkowo niska. Wartość siły dla której zarejestrowano początek kruchego pęknięcia w warunkach otoczenia, była niespełna 15% wyższa niż w warunkach kriogenicznych. O wspomnianej wcześniej kruchości może świadczyć również spadek wartości siły przy stałym przemieszczeniu, bowiem wartość średnia tej cechy w warunkach otoczenia była wyższa od tej samej wielkości wyznaczonej dla warunków kriogenicznych o około 10%.

5. Wnioski końcowe

- Warunki kriogeniczne powodują spadek odporności na pęknięcie stopu Ti6Al4V w odniesieniu do warunków otoczenia.
- Spadek odporności na pęknięcie jest jednakowo odnosi się do wszystkich wyznaczonych wielkości (wraz z P_{max}), jednak największą różnicę zaobserwowano w części plastycznej rozwarcia pęknięcia COD.
- W dalszych badaniach sugeruje się wyznaczenie tych samych wielkości charakteryzujących odporność na pęknięcie tytanu grade 5, ale dla podwyższonych temperatur.
- Propozycją do dalszych badań prowadzonych w tym zakresie jest wyznaczenie odporności na pęknięcie dla Ti6Al4V w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych za pomocą innych miar, takich jak K_{IC} oraz G_{IC} .
- Na podstawie przeprowadzonego badania oraz uzyskanych wyników można stwierdzić, że krytyczna wartość rozwarcia pęknięcia stopu Ti6Al4V w warunkach kriogenicznych jest o 65,43% niższa niż w warunkach otoczenia.

Bibliografia

- [1] Bazarnik, P., *et al.*, "Mechanical and microstructural characteristics of Ti6Al4V/AA2519 and Ti6Al4V/AA1050/AA2519 laminates manufactured by explosive welding", *Mater. Des.* 111, (2016), 146–157, doi: 10.1016/j.matdes.2016.08.088.
- [2] Boroński, D., Dzioba, I., Kotyk, M., Krampikowska, A., Pala, R., "Investigation of the fracture process of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material", *Materials (Basel)*. 13(10), (2020), 2226, doi: 10.3390/ma13102226.
- [3] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., "Fracture Toughness of Explosively Welded Al/Ti Layered Material in Cryogenic Conditions", *Procedia Struct. Integr.* 2, (2016), 3764–3771, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.468.
- [4] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., "Crack initiation and growth analysis in explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material in ambient and cryogenic conditions", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 232(8), (2018), 1470–1480, doi: 10.1177/0954406217741516.
- [5] Boroński, D., Kotyk, M., Maćkowiak, P., Śnieżek, L., "Mechanical properties of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material at ambient and cryogenic conditions", *Mater. Des.* 133, (2017), 390–403, doi: 10.1016/j.matdes.2017.08.008.
- [6] Boyce, B.L., Ritchie, R.O., "Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti-6Al-4V", *Eng. Fract. Mech.* 68(2), (2001), 129–147, doi: 10.1016/S0013-7944(00)00099-0.
- [7] Brunette, P., Tengvall, D.M., Textor, P., Thomsen, M., "Titanium in Medicine, Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications", Springer, Heidelberg – Berlin 2000.
- [8] "BS 7448-4:1997 – Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials".
- [9] Dobrzański, L.A., „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.

- [10] Garbacz, H., Ossowski, M., Wieceński, P., Wierzchoń, T., Kurzudłowski, K.J., „Mikrostruktura i właściwości warstw międzymetalicznych na stopie Ti-6Al-4V”, *Probl. Eksploat.* 1, (2007), 45–56.
- [11] Han, K., Shuai, J., Deng, X., Kong, L., Zhao, X., Sutton, M., “The effect of constraint on CTOD fracture toughness of API X65 steel”, *Eng. Fract. Mech.* 124–125, (2014), 167–181, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.014.
- [12] Hollander, D.A., *et al.*, “Structural, mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming”, *Biomaterials* 27(7), (2006), 955–963, doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.07.041.
- [13] Horiya, T., Kishi, T., “Relationship between fracture toughness and crack extension resistance curves (R curves) for Ti-6Al-4V alloys”, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 29 A(3), (1998), 781–789, doi: 10.1007/s11661-998-0269-9.
- [14] Inagaki, I., Takechi, T., Shirai, Y., Ariyasu, N., “Application and features of titanium for the aerospace industry”, *Nippon Steel Sumitomo Met. Tech.* 106(106), (2014), 22–27, <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf> (dostęp: 17.07.2017).
- [15] Jedynek, B., Mierzwińska-Nastalska, E., „Tytan – właściwości i zastosowanie w protetyce stomatologicznej”, *Dental Forum* 41(1), (2013), 75–78.
- [16] Karolewska, K., Ligaj, B., “Comparison analysis of titanium alloy Ti6Al4V produced by metallurgical and 3D printing method”, *AIP Conference Proceedings*, 2077, 2019, doi: 10.1063/1.5091886.
- [17] Kerr, W.R., “The effect of hydrogen as a temporary alloying element on the microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V”, *Metall. Trans. A* 16(6), (1985), 1077–1087, doi: 10.1007/BF02811677.
- [18] Kłysz, S., „Podstawy mechaniki pęknięcia i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów”, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2015.
- [19] Koike, M., Cai, Z., Fujii, H., Brezner, M., Okabe, T., “Corrosion behavior of cast titanium with reduced surface reaction layer made by a face-coating method”, *Biomaterials* 24(25), (2003), 4541–4549, doi: 10.1016/S0142-9612(03)00063-2.
- [20] Kotyk, M., „Analiza odporności na pęknięcie materiałów warstwowych”, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Bydgoszcz 2020.
- [21] Kotyk, M., “Analytic model of maximal experimental value of stress intensity factor K_{Ic} for AA2519–AA1050–Ti6Al4V layered material”, *Materials (Basel)*. 13(19), (2020), 1–17, doi: 10.3390/ma13194439.
- [22] Kotyk, M., Boroński, D., Maćkowiak, P., “The influence of cryogenic conditions on the process of AA2519 aluminum alloy cracking”, *Materials (Basel)*. 13(7), (2020), doi: 10.3390/ma13071555.
- [23] Kowalewski, Z.L., Szymczak, T., Kraskowski, J., Chojnacki, A., „Mechanika pęknięcia na tropach awarii konstrukcji i defektów materiałowych”, XXIII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, 2017, 39–74.
- [24] Nalla, R.K., Altenberger, I., Noster, U., Liu, G.Y., Scholtes, B., Ritchie, R.O., “On the influence of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening-on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures”, *Mater. Sci. Eng. A* 355(1–2), (2003), 216–230, doi: 10.1016/S0921-5093(03)00069-8.

Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczną wartość rozwarcia wierzchołka pęknięcia stopu tytanu Ti6Al4V

- [25] Niinomi, M., "Mechanical properties of biomedical titanium alloys", *Mater. Sci. Eng. A* 243(1–2), (1998), 231–236, doi: 10.1016/s0921-5093(97)00806-x.
- [26] Ochonogor, O.F., Akinlabi, E.T., Nyembwe, D., "A review on the effect of creep and microstructural change under elevated temperature of Ti6Al4V alloy for Turbine engine Application", *Mater. Today Proc.* 4(2), (2017), 250–256, doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.019.
- [27] Rozumek, D., „Mieszane sposoby pęknięcia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych”, Politechnika Opolska, Opole 2009.
- [28] Szachogluchowicz, I., Śniezek, L., Hutsaylyuk, V., "Low Cycle Fatigue Properties Laminate AA2519-Ti6Al4V", *Procedia Eng.* 114, (2015), 26–33, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.022.
- [29] Szachogluchowicz, I., Śniezek, L., Torzewski, J., Grzelak, K., "Fatigue cracking of AA2519-Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding", *Solid State Phenom.* 250, (2016), 182–190, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.250.182.
- [30] Tagawa, T., *et al.*, "Difference between ASTM E1290 and BS 7448 CTOD estimation procedures", *Weld. World* 54(7–8), (2010), R182–R188, doi: 10.1007/BF03263504.
- [31] Vardiman, R.G., Kant, R.A., "The improvement of fatigue life in Ti-6Al-4V by ion implantation", *J. Appl. Phys.* 53(1), (1982), 690–694, doi: 10.1063/1.329977.
- [32] Wang, P., Hu, M., Dang, E., "Study on CTOD fracture toughness of welded joint of X80 marine drilling riser", *Adv. Mater. Res.* 228–229, (2011), 1163–1168, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.228-229.1163.
- [33] Zhang, W., Wang, M., Chen, W., Feng, Y., Yu, Y., "Preparation of TiBw/Ti-6Al-4V composite with an inhomogeneous reinforced structure by a canned hot extrusion process", *J. Alloys Compd.* 669, (2016), 79–90, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.228.
- [34] Zhao, H., Liu, Q., Xie, Y., "The microstructure and texture analysis of Ti-6Al-4V alloy through linear friction welding", International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering, 2015, doi: 10.2991/mebe-15.2015.73.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).