



# Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczne rozwarcia wierzchołka szczeliny stopu aluminium AA2519

Maciej Kotyk<sup>1</sup>, Wojciech Ziółkowski<sup>2\*</sup>, Radosław Stachowiak<sup>3</sup>, Piotr Swacha<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

<sup>3</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

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

\* Autor korespondencyjny; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

**Streszczenie:** Zasadniczy cel badania to wyznaczenie wartości *CTOD* dla aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Było to potrzebne, aby określić wpływ wspomnianych warunków temperaturowych na badany stop. Badanie pozwalające na podjęcie próby wyznaczenia wartości *CTOD* analizowanego stopu przeprowadzono w kilku etapach. Pierwszym etapem było przygotowanie próbek CT. Następnie przystąpiono do generowania pęknięcia zmęczeniowego. Ostatecznie każdą z próbek obciążano monotonicznie narastającym obciążeniem aż do utworzenia się zawiasu plastycznego lub całkowitego odseparowania poszczególnych części próbek. W pracy zaprezentowano podstawę teoretyczną oraz przyjętą metodykę badawczą. Przedstawiono uzyskane wyniki badań oraz dokonano analizy wybranych parametrów materiałowych. Dzięki przeprowadzonej analizie zaobserwowano wpływ warunków kriogenicznych na wartość parametru *CTOD*. Udało się ponadto zebrać wyniki umożliwiające w przyszłości analizę materiału Al-Ti, którego jednym z materiałów bazowych jest badany stop aluminium.

**Słowa kluczowe:** *CTOD*, *RWP*, wpływ warunków otoczenia, mechanika pękania, pękanie zmęczeniowe, aluminium

---

# Influence of cryogenic conditions on the crack tip opening displacement of AA2519 aluminum alloy

Maciej Kotyk<sup>1</sup>, Wojciech Ziółkowski<sup>2\*</sup>, Radosław Stachowiak<sup>3</sup>, Piotr Swacha<sup>4</sup>

<sup>1</sup> UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.kotykatp.edu.pl

<sup>2</sup> UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

<sup>3</sup> UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

<sup>4</sup> 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: wojzio002@utp.edu.pl

**Summary:** Basically, the aim of the study was to determine the value *CTOD* of AA2519 aluminum alloy under ambient and cryogenic conditions. The research of *CTOD* was carried out in several stages. The first step was to prepare the CT sample. Then, the generation of the fatigue crack was started. Finally, the sample was loaded to separate individual parts. The work presents practical research methods. The obtained test results were presented and the material parameters were analyzed. By carrying out an research in cryogenic conditions on the value of the *CTOD* parameter it will be possible to collect results for Al-Ti composite material, the starting material of which is an aluminum alloy being tested.

**Key words:** *CTOD*, *RWP*, influence of environmental conditions, fracture mechanics, fatigue cracking, aluminum

## 1. Wstęp

Z powodu nieustannego postępu technologicznego konstruktorzy są zmuszeni do projektowania maszyn i urządzeń o coraz większej niezawodności oraz o coraz dłuższym czasie eksploatacji. Dąży się jednocześnie do tego, aby masa tych urządzeń była jak najmniejsza. Takie wyzwanie konstrukcyjne jest możliwe do zrealizowania m.in. dzięki dostatecznej wiedzy na temat właściwości fizykochemicznych i mechanicznych stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Generuje to potrzebę przeprowadzania szczegółowych badań laboratoryjnych w celu dokładnego poznania wyżej opisanych właściwości.

Podstawowymi badaniami materiałów są badania statyczne, m.in. próba rozciągania i ściskania, statyczne i dynamiczne badania twardości, badania udarności i próby zmęczeniowe. Elementy urządzeń podczas eksploatacji pracują najczęściej w warunkach zmiennego obciążenia, co powoduje, że częstą przyczyną uszkodzenia jest inicjacja, a następnie – propagacja pęknięcia zmęczeniowego. Wspomniane warunki pracy elementu są uzasadnieniem podjęcia badań propagacji pęknięcia.

Analiza propagacji pęknięcia przeprowadzana jest dla różnych materiałów, a jej wyniki przyczyniają się do wyznaczenia wartości, które pozwalają opisać stany graniczne dla konkretnych zjawisk zmęczeniowych. Wśród kryteriów, które pozwalają określić stany graniczne, wyróżnia się kryteria: naprężeniowe, energetyczne, lokalne i przemieszczeniowe.

Kryteria przemieszczeniowe bazują na wartości rozwarcia wierzchołka pęknięcia RWP (z ang. *CTOD*) [9]. Stosuje się je dla materiałów sprężysto-plastycznych i plastycznych. Parametr *CTOD* można powiązać z promieniem strefy odkształcenia plastycznego i długością pęknięcia. Parametr ten wykorzystuje się do analizy rzeczywistego obiektu poddanego eksploatacji.

Opisując kryteria stanów granicznych w mechanice pęknięcia, stosuje się co najmniej kilka wielkości. Należą do nich *CTOD*, *K<sub>IC</sub>*, *J<sub>IC</sub>*, *G<sub>IC</sub>* i inne. Materiałami o interesujących – w kontekście omówionych we wstępie – charakterystykach mechanicznych i fizycznych są coraz częściej używane w odpowiedzialnych konstrukcjach, stopy aluminium. Jedną z grup tych stopów to durale, czyli stopy AA 2XXX, które są chętnie stosowane w konstrukcjach statków powietrznych czy też w pojazdach bojowych.

Badania aluminium AA2519 przedstawione w tej publikacji są wstępem do dalszych badań nad materiałem kompozytowym AA2519-AA1050-Ti6Al4V [4]. Mają na celu porównanie własności materiałów bazowych i nowo powstałego kompozytu. Ze względu na charakter porównawczy dalszych badań zasadne jest wykorzystanie wartości parametru *CTOD*, która w odpowiedniej interpretacji pozwala porównać ze sobą materiały o znacznie różniących się własnościach mechanicznych, jak w przypadku wspomnianego wcześniej materiału warstwowego Al-Ti. Takie wielkości, jak *K<sub>IC</sub>* i *J<sub>IC</sub>*, niekiedy takiej możliwości nie dają.

Badania z wykorzystaniem metody *CTOD* były już przeprowadzane i zostały opisane w literaturze [6, 8, 18]. Przebieg badań zrealizowano w oparciu o wytyczne

zawarte w normie brytyjskiej BS 7448-1 [5]. Przedstawione badania wskazują, że norma BS 7448 jest wciąż wykorzystywana podczas badań *CTOD*, równolegle z normą ASTM E1290 [17].

## 2. Metodyka badań

### 2.1. Obiekt badań

Obiektem badań był trudno spawalny stop aluminium AA2519 po obróbce cieplnej. Wspomniane ujednocianie cieplne było typowe dla stopów duraluminium i polegało na wygrzewaniu arkusza blachy przez dwie godziny w temperaturze 530°C oraz przyspieszonym starzeniu w temperaturze 165°C przez 10 h. Obróbka cieplna miała na celu przesylenie aluminium cząsteczkami miedzi i tym samym – wytworzenie fazy  $\theta$ . Dane o ilości wspomnianej miedzi zawartej w omawianym materiale oraz o pozostałych pierwiastkach wchodzących w skład chemiczny AA2519 zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Skład chemiczny badanego materiały AA2519 [12]

**Table 1.** Chemical composition of the aluminum alloy AA2519 [12]

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	V	Zr
0,06	0,08	5,77	0,18	0,01	0,04	0,12	0,2

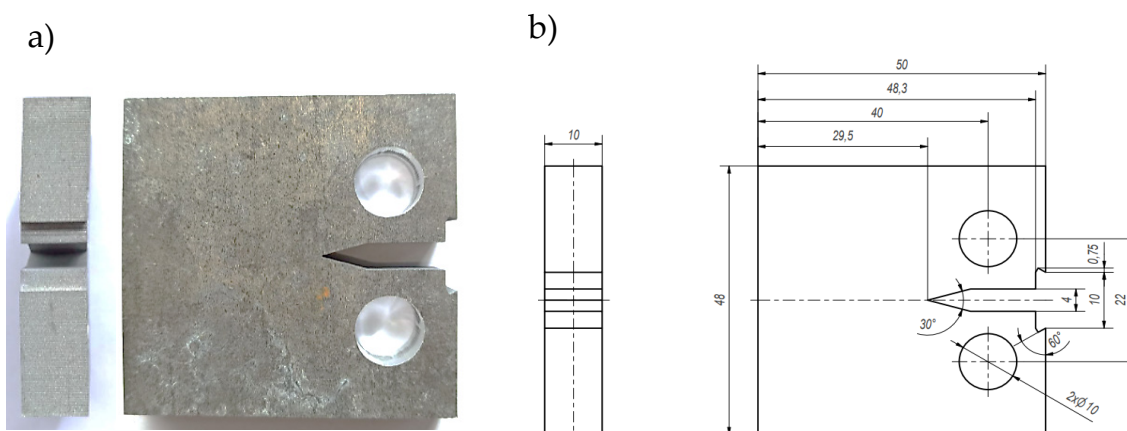
Materiał AA2519 nie jest szeroko opisywany w literaturze. Znane są jego wybrane własności technologiczne, użytkowe oraz zastosowanie [7]. W cytowanej literaturze można odnaleźć informacje o tym, że badany stop jest trudno spawalny, a w rozwiązaniach konstrukcyjnych stosuje się go do budowy pancerni amfibii wojskowych. Przyczyniają się do tego niewielka (w odniesieniu do stali) gęstość blachy wykonanej z tego materiału, odporność korozyjna i balistyczna.

Podczas analizy literatury dotyczącej omawianego stopu napotkano publikacje, w których zaprezentowano informacje odnośnie charakterystyk mechanicznych materiału 2519 [15, 19], w tym także odporności na pękanie dla tego materiału [2, 3, 10, 12–14, 16]. Z przedstawionych pozycji literaturowych wynika, że wzrost zainteresowania opisywanym materiałem jest najprawdopodobniej spowodowany opracowaniem technologii wykonywania materiału warstwowego AA2519-AA1050-Ti6Al4V z wykorzystaniem technologii wysokoenergetycznych, takich jak zgrzewanie wybuchowe. Jednak w żadnej z prac odnalezionych w ogólnodostępnych źródłach literaturowych nie znaleziono informacji dotyczącej krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia *CTOD*. W związku z tym postanowiono wyznaczyć tę wielkość charakteryzującą odporność materiału na pękanie.

### 2.2. Procedura badawcza

Do badań realizowanych w celu wyznaczenia krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia wykorzystano próbki zwarte typu CT. Były one w całości wykonane z badanego materiału. Ich geometria została opracowana zgodnie z przytaczaną

wcześniej normą brytyjską. Widok próbki oraz jej główne wymiary geometryczne zaprezentowano na rysunku 1.



**Rys. 1.** Próbką zwarta (CT) wykorzystana podczas badań: a) widok próbki,  
b) wybrane wymiary próbki [opracowanie własne]

**Fig. 1.** Compact tension specimen (CT) used in the tests: (a) specimen view,  
(b) selected specimen dimensions [own study]

Ze względu na specyficzne wymagania dotyczące karbu mechanicznego, próbka poza otworami została wykonana z wykorzystaniem metod elektroerozyjnych. Pozwoliło to, na uzyskanie zaokrąglenia na dnie karbu mechanicznego o wartości około 0,32 mm. Należy zaznaczyć, że wszystkie próbki były wycinane z jednego arkusza blachy, na jednym zamocowaniu i w taki sposób, aby kierunek walcowania blachy był równoległy do płaszczyzny pęknięcia.

Wszelkie wymuszenia mechaniczne podczas badań były generowane przez maszynę wytrzymałościową typu Instron z hydraulicznym układem zasilania. Zdecydowano się na zastosowanie właśnie takiej maszyny ze względu na cykliczny charakter pierwszego etapu eksperymentu. Polegał on bowiem na wygenerowaniu pęknięcia zmęczeniowego (ang. *precrack*) w celu uzyskania możliwie ostrego karbu w materiale. Dodatkową korzyścią płynącą z wykonania wstępnego pęknięcia zmęczeniowego jest oddalenie czoła pęknięcia od powierzchni zewnętrznej karbu mechanicznego, którego własności powierzchniowe zostały zmienione przez obróbkę elektroiskrową.

Pierwszy etap, tj. generowanie pęknięcia, odbywał się wyłącznie w temperaturze otoczenia. Było to konieczne, bowiem przyrost pęknięcia zmęczeniowego był kontrolowany za pomocą metod optomechanicznych, bazujących na cyfrowej korelacji obrazu. Wspomniane metody byłyby nieskuteczne w temperaturze kriogenicznej, a zarejestrowanie obrazu próbki w kąpieli z wrzącego azotu było niemal niemożliwe. Metodę pomiaru przyrostu pęknięcia zmęczeniowego oraz sposób interpretacji rejestrowanego obrazu opisano w pracach [1–3, 11–13]. Należy zaznaczyć, że oprogramowanie było skonfigurowane w taki sposób, aby po osiągnięciu zadanej długości pęknięcia zmęczeniowego następowało zatrzymanie pracy maszyny przy jednoczesnym odciążeniu próbki. Aby zabezpieczyć próbkę przed nadmiernym rozwarciem, w jej zamku umieszczano ekstensometr *COD*, a na

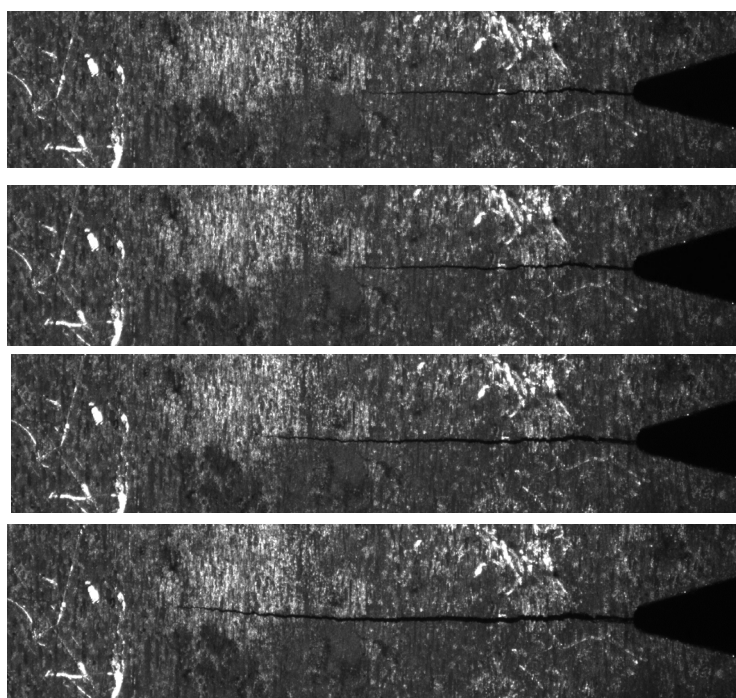
panelu maszyny wytrzymałościowej wprowadzano stosowne limity, określone drogą empiryczną.

Wielkości charakteryzujące sposób obciążania próbki podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego zaprezentowano w tabeli 2, natomiast wybrane obrazy przedstawiające przyrost pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas badania – rysunku 2.

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

**Table 2.** Selected characteristics that characterize how the specimen is loaded when generating a fatigue crack [own study]

materiał	częstotliwość Hz	obciążenie kN
AA2519	5	4,7

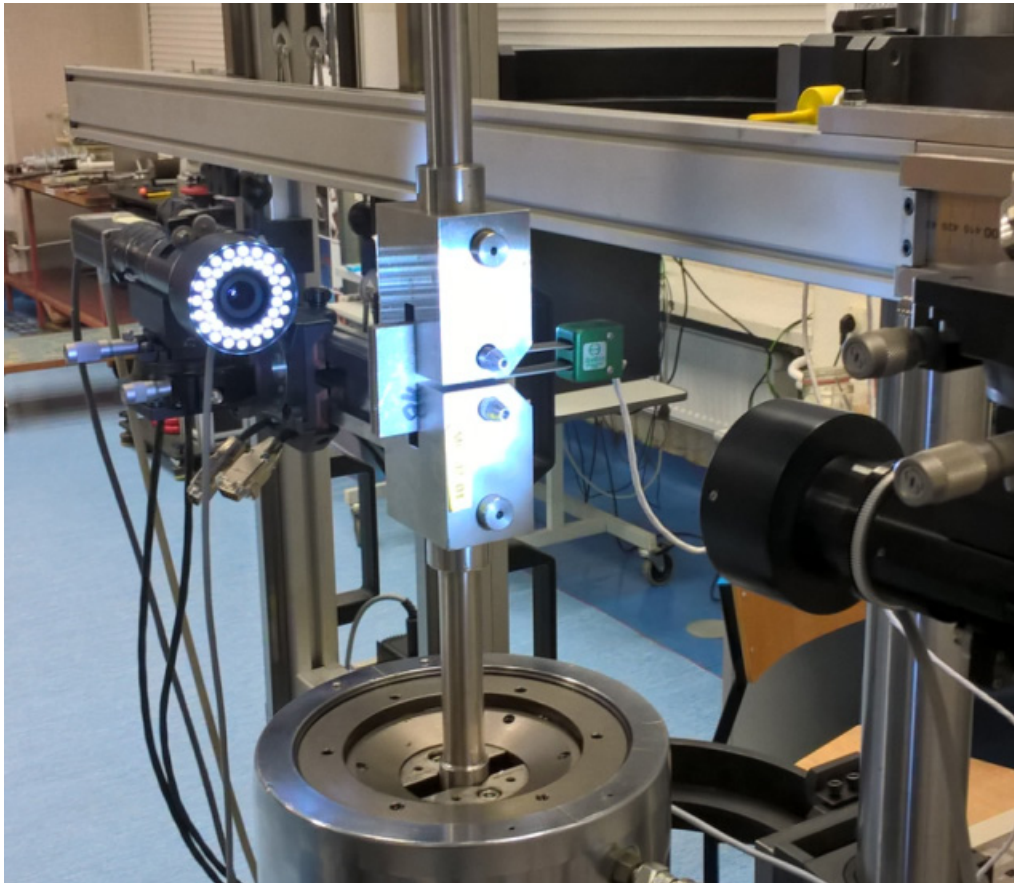


**Rys. 2.** Wybrane fazy wzrostu pęknięcia zmęczeniowego zarejestrowane podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego w próbce CT z materiału AA2519 [opracowanie własne]

**Fig. 2.** Selected fatigue crack growth phases recorded during fatigue crack generation in CT specimen made of AA2519 [own study]

Trudno jednoznacznie określić liczbę cykli potrzebną do wygenerowania pęknięcia zmęczeniowego o właściwej dla dalszej części badań długości, jednak mieści się ona w przedziale od 10000 do 30000 cykli odzerowo tętniących.

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

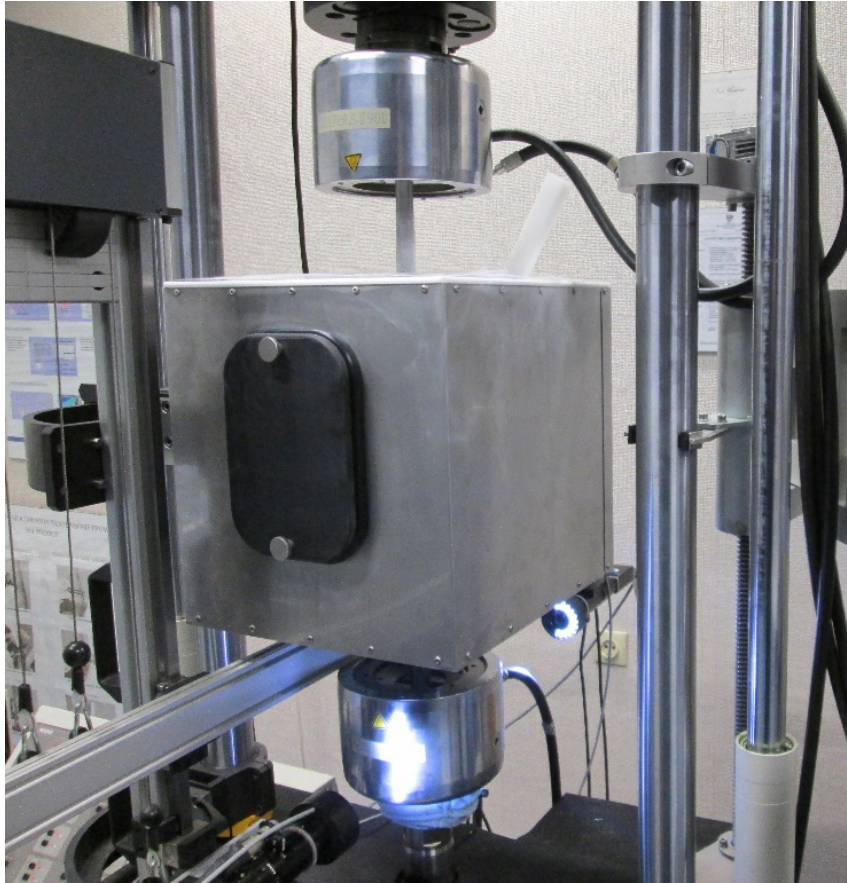


**Rys. 3.** Próbkę zamocowaną na maszynie wytrzymałościowej podczas generowania pęknięcia zmęczeniowego [opracowanie własne]

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

Drugi etap eksperymentu, który stanowił jego zasadniczą część, odbywał się w zależności od potrzeb w dwóch różnych warunkach temperaturowych, tj. w temperaturze otoczenia i w temperaturze kriogenicznej. Sposób obciążania próbki był taki sam niezależnie od warunków temperaturowych badania. Próbkę poprzez trzpienie i sworznie obciążano monotonicznie narastającym obciążeniem aż do utworzenia się zawiasu plastycznego lub całkowitego odseparowania poszczególnych części próbek, bowiem te pękały symetrycznie. Sterowanie maszyną realizowano poprzez kanał przemieszczenia, a prędkość przesuwu tłoka wynosiła  $0,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Poza sygnałem sterującym rejestrowano również dane z kanału siły oraz odkształcenia (w rozpatrywanym przypadku *COD*).

Badania w warunkach kriogenicznych zasadniczo odbywały się w taki sam sposób. Różnica polegała na zastosowaniu komory środowiskowej. W jej wnętrzu umieszczano próbkę, która w trakcie trwania eksperymentu zanurzona była w ciekłym azocie. 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]

Szczególny nacisk podczas badania nałożono na zapewnienie odpowiedniej ilości ciekłego azotu podczas badania, bowiem ten gwałtownie odparowywał. Nie rozpoczynano również badań do momentu, aż ustabilizowała się temperatura we wnętrzu komory.

### 3. Wyniki

Zasadniczy cel badania to wyznaczenie wartości *CTOD* dla aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Było to konieczne, aby określić wpływ wspomnianych warunków temperaturowych na badaną charakterystykę. Kolejny etap badań to porównanie tej samej cechy materiałowej, wyznaczonej dla materiału warstwowego Al-Ti, w skład którego wchodzi stop AA2519. Opisywane porównanie będzie jednak przedmiotem kolejnej publikacji.

Wyniki uzyskane podczas przeprowadzania badań poddano analizie zgodnie z zależnościami matematycznymi opisanymi w normie BS 7448. Ostatecznie wartość  $\delta$ , którą można utożsamić z *CTOD*, wyznaczono z zależności:

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



Wpływ warunków kriogenicznych na krytyczne rozwarcia wierzchołka szczeliny  
stopu aluminium AA2519

gdzie:

- $\delta$  – CTOD,
- $C, B, W$  – wymiary charakterystyczne próbki CT,
- $\nu$  – liczba Poissona,
- $R_{p0.2}$  – umowna granica plastyczności,
- $E$  – moduł Younga,
- $a_0$  – długość szczeliny początkowej,
- $V_P$  – wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym,
- $F$  – siła,
- $z$  – odległość pomiędzy punktem zamocowania ekstensometru a powierzchnią próbki prostopadłą do płaszczyzny pęknięcia od strony karbu.

Wybrane wyniki uzyskane podczas badań oraz obliczeń zestawiono zbiorczo w tabeli 3. Przedstawione parametry to:

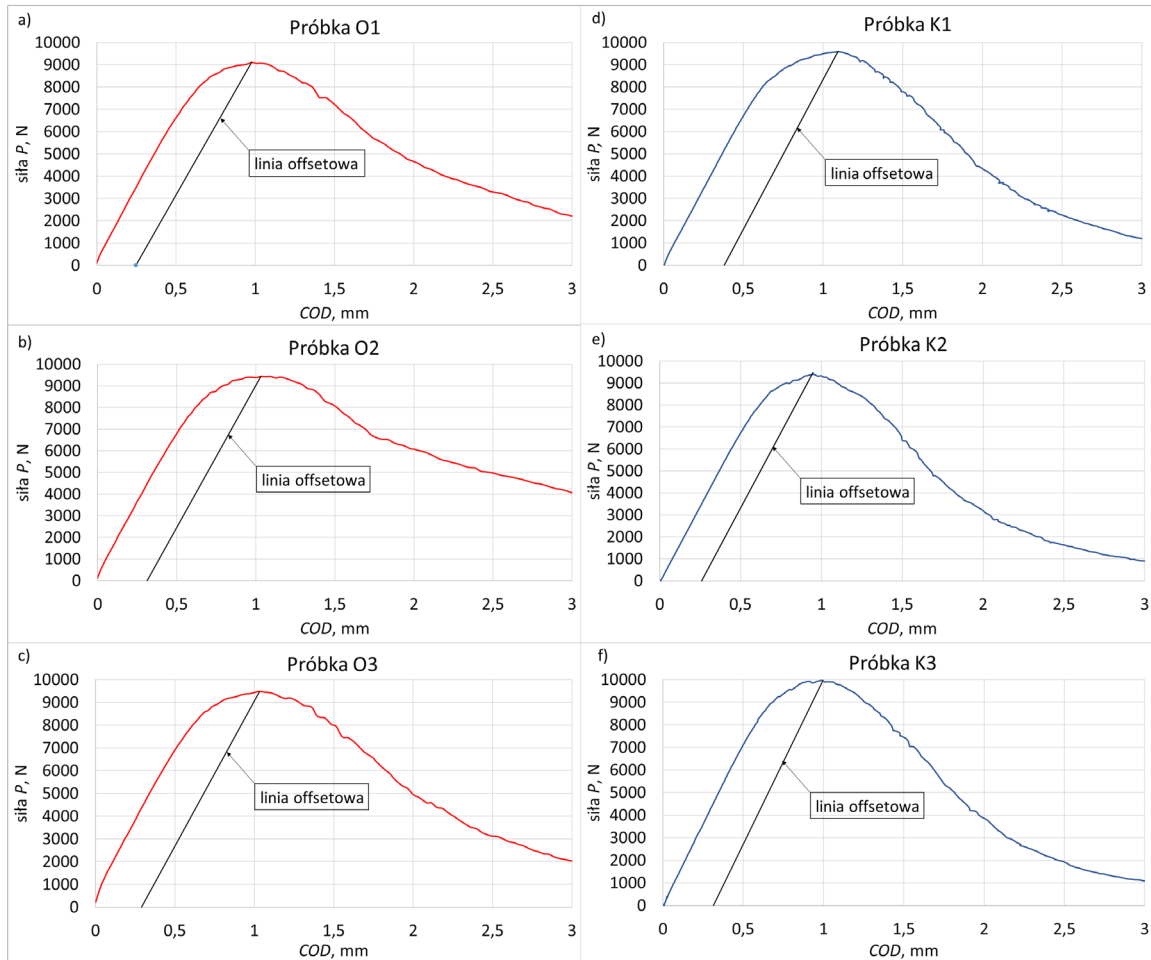
- $P_{MAX}$  – siła maksymalna,
- $V_P$  – wartość rozwarcia pęknięcia przy odkształceniu plastycznym,
- $F_C$  – siła przyłożona na początku rozszerzania się kruchego pęknięcia,
- $d1\%F1$  – procentowy spadek siły przy stałym przemieszczeniu,
- $\delta$  – CTOD.

**Tabela 3.** Wybrane wartości parametrów [opracowanie własne]

**Table 3.** Selected parameter values [own study]

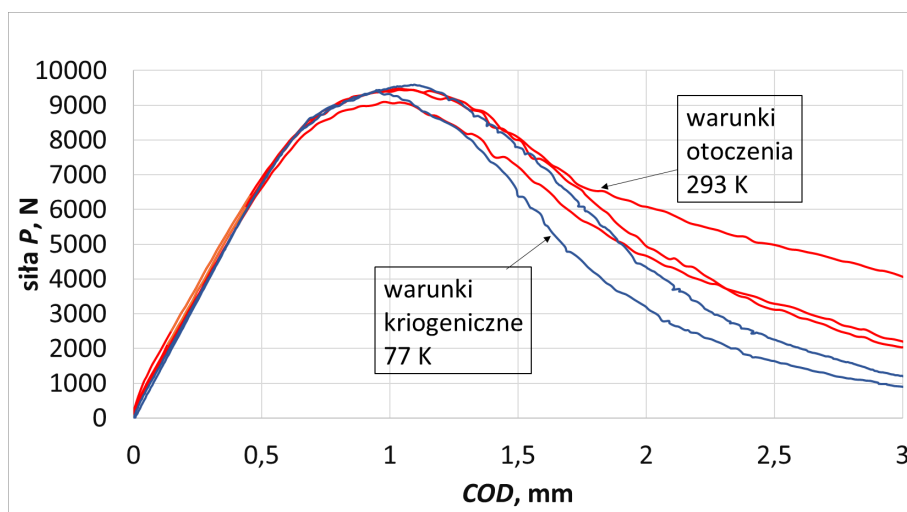
Lp. temp.	$P_{MAX}, N$		$V_P, mm$		$F_C, N$		$d1\%F1, \%$		$\delta, mm$	
	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K	293 K	77 K
1	9102	9599	0,246	0,715	9102	9598	4,99	2,25	0,449	0,379
2	9441	9405	0,311	0,258	9440	9479	3,95	4,70	0,496	0,258
3	9482	9956	0,288	0,314	9481	9955	4,16	2,52	0,288	0,400
Średnia	9342	9653	0,282	0,429	9341	9677	4,37	3,16	0,411	0,346
Odch. Standard.	209	279	0,033	0,249	208	248	0,55	1,34	0,109	0,077

Przebiegi siła – rozwarcie pęknięcia (COD) uzyskane podczas badań laboratoryjnych przedstawiono w postaci graficznej dla każdej z próbek na rysunku 5. Porównanie przebiegów dla wszystkich badanych próbek w obu warunkach temperaturowych zaprezentowano na rysunku 6.



**Rys. 5.** Poszczególne przebiegi siła – COD wyznaczone dla stopu AA2519 dla warunków otoczenia (a, b, c) i dla warunków kriogenicznych (d, e, f) [opracowanie własne]

**Fig. 5.** Individual waveform force – COD determined for alloy AA2519 for ambient conditions (a, b, c) and cryogenic conditions (d, e, f) [own study]

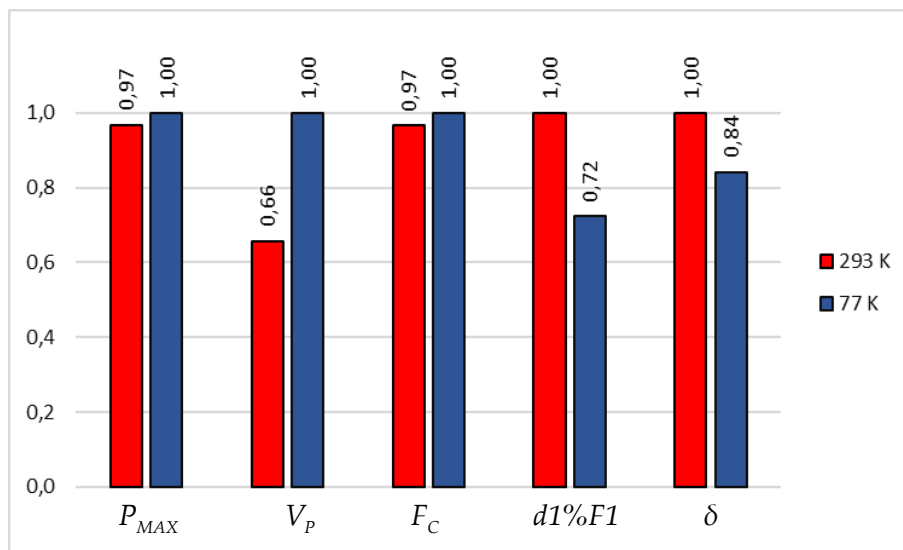


**Rys. 6.** Porównanie przebiegów siła – COD wyznaczone dla stopu AA2519 dla warunków otoczenia i dla warunków kriogenicznych [opracowanie własne]

**Fig. 6.** Strength Waveform Comparison – COD determined for alloy AA2519 under ambient and cryogenic conditions [own study]

#### 4. Analiza wyników badań

Wartości średnie wybranych parametrów zestawiono w postaci graficznej w celu porównania własności materiałowych uzyskanych w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych. Porównanie uśrednionych wartości wybranych parametrów uzyskanych podczas wyznaczania  $CTOD$  dla stopu AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych normalizowane do 1 przedstawiono na rysunku 7. Należy jednak zaznaczyć, że wielkość  $P_{max}$  silnie zależy od długości wstępnego pęknięcia zmęczeniowego i w przedstawionym zestawieniu ma ona wyłącznie charakter uzupełniający.



Rys. 7. Znormalizowane do 1 porównanie wybranych wielkości, charakteryzujących odporność na pęknięcie wyrażoną poprzez  $CTOD$ , wyznaczonych dla stopu AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych [opracowanie własne]

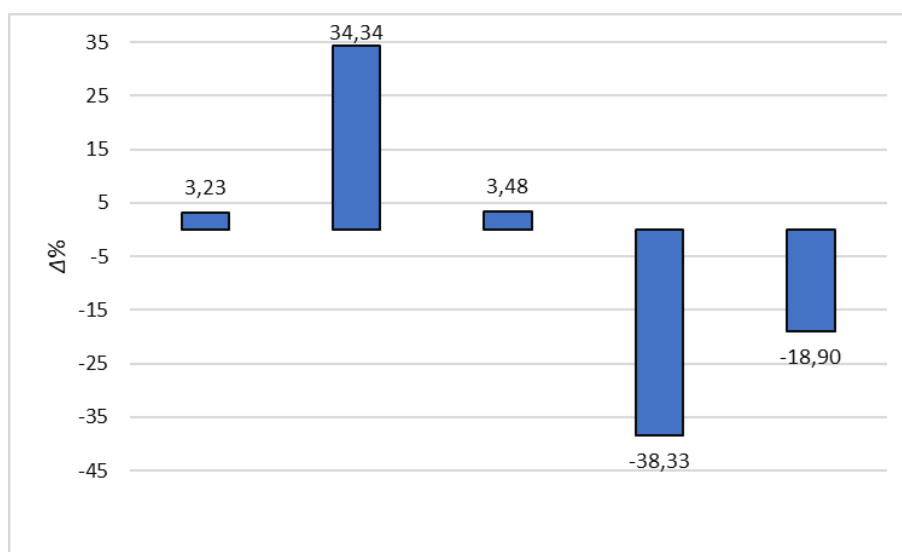
Fig. 7. Standardized to 1 comparison of selected values characterizing the fracture toughness expressed by  $CTOD$ , determined for the AA2519 alloy in ambient and cryogenic conditions [own study]

Obliczono także procentowy wpływ warunków kriogenicznych na własności materiałowe. Graficzne przedstawienie tych obliczeń zaprezentowano na rysunku 8. Wyniki te uzyskano na podstawie poniższego wzoru.

$$\Delta_{\%} = \frac{X_W - X_N}{X_W} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$X$  –  $P_{MAX}$ ,  $V_P$ ,  $F_C$ ,  $d1\%F1$ ,  $\delta$



**Rys. 8.** Procentowy wpływ warunków kriogenicznych na wybrane własności stopu AA2519 [opracowanie własne]

**Fig. 8.** Percentage influence of cryogenic conditions on selected properties of AA2519 alloy [own study]

Analizując wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowane na rysunku 8, można zauważyć, że warunki kriogeniczne wpłynęły znacząco na parametr  $V_P$  oraz  $d1\%F1$  – różnica w tych wartościach między warunkami otoczenia a warunkami kriogenicznymi wynosi ponad 30%. Wartość  $\delta$  – utożsamiana z  $CTOD$  – również uległa zmianie pod wpływem spadku temperatury. Wartości wyznaczone dla  $P_{MAX}$  i  $F_c$  nie zareagowały drastycznie na obniżenie temperatury. Należy jednak pamiętać, że zarówno wartość maksymalnej zarejestrowanej siły jak i wartość siły, dla której zaobserwowano początek kruchego pęknięcia, silnie zależą od długości pęknięcia zmęczeniowego.

## 5. Wnioski końcowe

1. Badanie stopu aluminium AA2519 pozwoliło na poznanie jego własności materiałowych, co ułatwiło ich późniejsze porównanie z własnościami plateru Al-Ti.
2. Przebiegi siła –  $COD$  dla warunków otoczenia i warunków kriogenicznych są podobne do siebie. Świadczy to o ograniczonym wpływie warunków kriogenicznych na charakter przebiegu próby.
3. Wartość parametru  $V_P$ , zmierzonego w warunkach kriogenicznych, wzrosła o ponad 34% w stosunku do wartości  $V_P$  zmierzonej w warunkach otoczenia, natomiast wartość  $d1\%F1$  spadła o 38%.
4. Warunki kriogeniczne zauważalnie wpływają na wartość parametru  $CTOD$  dla stopu aluminium AA2519. Wartość tego parametru w temperaturze 77 K jest o 18,9% niższa niż w temperaturze 293 K. Świadczy to o niewielkim spadku odporności na pęknięcie.
5. Analizując wyniki badań, zauważono, iż warunki kriogeniczne nie wpływają znacząco na wartość siły  $P_{max}$  i  $F_c$ .

## Bibliografia

- [1] Boroński, D., Kotyk, M., "Measurement method of crack length in compact tension type specimens made from the Al-Ti layered material", *Probl. Eksploat.* 3(3), (2016), 17–26.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] "BS 7448-1:1991 – Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K<sub>Ic</sub>, critical CTOD and critical J values of metallic materials".
- [6] Donato, G.H.B., Ruggieri, C., "Estimation procedure for J and CTOD fracture parameters using three-point bend specimens", *Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC, 3A*, 149–158, 2007, doi: 10.1115/ipc2006-10165.
- [7] Fisher, J.J., Kramer, L.S., Pickens, J.R., "Aluminum alloy 2519 in military vehicles", *Adv. Mater. Process.* 160(9), (2002), 43–46.
- [8] 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.
- [9] Kłysz, S., „Podstawy mechaniki pęknięcia i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów”, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2015.
- [10] Kotyk, M., „Badanie odporności na pęknięcie stopu aluminium AA2519 w warunkach otoczenia i w warunkach kriogenicznych”, XVI Kraj. Konf. Mech. Pęknięcia Bydgoszcz-Fojutowo, 2017.
- [11] Kotyk, M., „Analiza odporności na pęknięcie materiału warstwowego Al-Ti”, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz 2018.
- [12] Kotyk, M., "Analytic model of maximal experimental value of stress intensity factor K<sub>q</sub> for AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material", *Materials (Basel)*. 13(19), (2020), 1–17, doi: 10.3390/ma13194439.
- [13] 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.
- [14] Najwer, M., Niesłony, P., "Microhardness and strength properties of metallic joint AA2519-AA1050-Ti6Al4V after various heat treatments", *Procedia Eng.* 149, (2016), 346–351, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.677.
- [15] Płonka, B., *et al.*, "Studies of the aa2519 alloy hot rolling process and cladding with en aw-1050a alloy", *Arch. Metall. Mater.* 61(1), (2016), 381–388, doi: 10.1515/amm-2016-0070.

- [16] Szachogluchowicz, I., Śnieżek, L., Hutsaylyuk, V., "Low cycle fatigue properties of AA2519-Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding", *Eng. Fail. Anal.* 69, (2016), 77–87, doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.01.001.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Zuiko, I., Gazizov, M., Kaibyshev, R., "Superplasticity of an AA2519 aluminum alloy", *Mater. Sci. Forum*, 838–839, (2016), 278–284, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.278.



© 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/>).