



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

Wydział Inżynierii Mechanicznej

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INŻYNIERIA MECHANICZNA**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Karolina Karolewska

***ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ZMĘCZENIOWYCH ELEMENTÓW
ZE STOPU Ti6Al4V WYTWORZONYCH TECHNOLOGIĄ
ADDYTYWNA***

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR

dr hab. inż. Bogdan Ligaj

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. Mateusz Wirwicki

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

1. WSTĘP

Coraz popularniejsze wykorzystywanie technologii przyrostowych do wykonywania elementów konstrukcyjnych sprawia, że problematyka badawcza dotycząca określenia właściwości statycznych oraz zmęczeniowych Ti6Al4V jest aktualna. Zakłada się, że technologia addytywna bazująca na proszkach metali będzie coraz powszechniej stosowana w przemyśle. Obecne ograniczenia wynikają z: kosztów zakupu maszyn, ceny proszku oraz rynku zbytu na elementy wytwarzane metodą druku 3D. Dane literaturowe dotyczące wytwarzania elementów metodami addytywnymi ze stopu tytanu Ti6Al4V odnoszą się do wybranych czynników związanych z procesem wytwarzania części i ich wpływem na właściwości mechaniczne (statyczne i zmęczeniowe) materiału.

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że autorzy publikacji naukowych skupiają się na parametrach procesu wytwarzania metodą addytywną i ich wpływie na wytrzymałość mechaniczną w warunkach obciążeń statycznych, a także obciążeniach zmiennych na wytrzymałość zmęczeniową elementów konstrukcyjnych. Dokonując szczegółowych porównań wyników badań uzyskanych przez różnych autorów stwierdzono, że:

- kierunek druku w dużej mierze wpływa na uzyskane właściwości mechaniczne w warunkach obciążeń statycznych oraz zmęczeniowych,
- parametry procesu druku tj. gęstość mocy lasera oraz ścieżka skanowania w głównej mierze wpływają na wytrzymałość statyczną, a także zmęczeniową wytwarzanych technologią addytywną elementów,
- gradienty temperatury występujące w procesach addytywnych wpływają na występowanie naprężeń własnych drukowanych elementów i są przyczyną niższej odporności na odkształcenia, niższej wytrzymałości statycznej oraz dynamicznej, a także niskiej wytrzymałości zmęczeniowej,
- elementy metalowe powstające w procesie wytwarzania addytywnego charakteryzują się wysokimi wartościami parametrów chropowatości powierzchni, co znacząco wpływa na ich trwałość zmęczeniową,
- w większości przypadków mikrostruktura stopu Ti6Al4V wytworzonego metodami addytywnymi jest jednofazową strukturą α' ,
- najwyższą trwałość zmęczeniową elementów wykonanych metodą addytywną można uzyskać stosując jednocześnie obróbkę powierzchniową z obróbką cieplną, mającą na celu usunięcie porowatości oraz modyfikację mikrostruktury materiału.

Wykonywanie elementów metalowych technologiami addytywnymi powstało stosunkowo niedawno, dlatego liczba publikacji dostarczających informacji na ich temat gwałtownie wzrasta. W literaturze występuje ograniczona liczba wyników badań dotycząca metody addytywnej DMLS w zakresie wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej. Przedstawione w odnalezionych źródłach wyniki badań zmęczeniowych odnoszą się do trwałości wysokocyklowej realizowanej w warunkach sterowania naprężeniem. Nie odnaleziono prac bazujących na innym ujęciu np. odkształceniowym lub energetycznym. Wszystkie analizowane wyniki badań innych autorów odnoszą się do globalnych właściwości materiału Ti6Al4V. Nie odnaleziono prac, które rozpatrywałyby właściwości lokalne elementów powstałych technologią addytywną, a co z tym związane określenia, czy struktura materiału powstałego taką metodą jest jednorodna, tak jak materiału powstającego w standardowym procesie wytopu. Wyniki uzyskiwane przez autorów są bardzo rozbieżne, gdyż na końcowe właściwości materiału wpływa wiele zmiennych.

Mimo wielu publikacji nadal trudno jest przewidzieć zachowanie się materiału wytworzonego metodą druku 3D i należy poszerzać badania mające na celu jak najdokładniejsze poznanie materiałów wykonanych tą technologią. Świadczy to o potrzebie prowadzenia badań, które stały się przedmiotem niniejszej rozprawy.

2. TEZA, CEL I ZAKRES ROZPRAWY WSTĘP

2.1. TEZA BADAWCZA

Wykonanie elementów konstrukcyjnych ze stopu tytanu Ti6Al4V metodą addytywną (kierunek druku zgodny z osią Z) pozwala na uzyskanie takich samych lub wyższych (w ujęciu statystycznym), w porównaniu do elementów wykonanych metodą tradycyjną, właściwości mechanicznych w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych.

2.2. CELE PRACY

Podstawowymi celami pracy były:

- analiza porównawcza wyników badań w warunkach obciążeń statycznych próbek wytworzonych z pręta ciągnionego oraz wytworzonych metodą addytywną tj. R_m, R_{p0,2}, E, A, Z,
- analiza porównawcza wyników badań w warunkach obciążeń zmiennych w zakresie niskocyklowego zmęczenia,
- analiza wyników twardości powierzchniowej materiału wytworzonego metodą tradycyjną i metodą addytywną.

2.3. ZAKRES PRACY

Dysertacja doktorska podzielona została na 7 rozdziałów. Początkowy fragment pracy (rozdziały: 1–3) zawiera wyniki analizy literatury dotyczące właściwości materiału wytworzonego technologią addytywną. Rozdział pierwszy obejmuje historię metod addytywnych. W rozdziale drugim scharakteryzowano materiał przyjęty do badań, natomiast trzeci rozdział zawiera obszerną analizę stanu wiedzy, która pozwoliła na sformułowanie tezy oraz zbudowanie planu badawczego.

Druga część pracy obejmuje program badań oraz przedstawienie uzyskanych wyników wraz z ich analizą.

W części eksperymentalnej pracy realizowano testy na obiektach badań wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Obiekty do badań przygotowano metodą tradycyjną (próbki toczone z pręta ciągnionego) i metodą addytywną DMLS. Wykonane badania dotyczyły:

- a) wyznaczenie właściwości materiału w warunkach obciążeń zmiennych dla niskocyklowego zakresu zmęczenia
- b) wyznaczenia właściwości materiału w warunkach obciążeń statycznych,
- c) wyznaczenia twardości powierzchniowej obiektów,
- d) oceny cech geometrycznych stosowanych obiektów.

Ostatni rozdział rozprawy zawiera wnioski końcowe oraz możliwe dalsze kierunki badań.

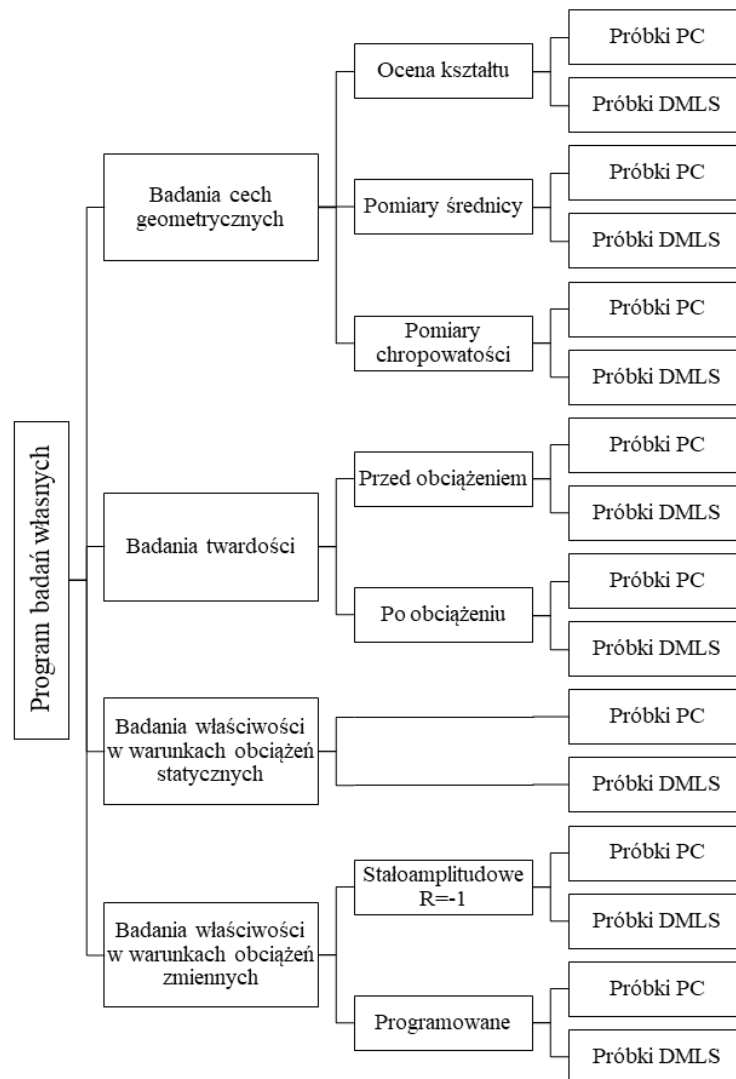
3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. PROGRAM BADAŃ WŁASNYCH

Program badań własnych przedstawiono w sposób schematyczny na rysunku 3.1.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie właściwości mechanicznych stopu tytanu Ti6Al4V wytworzonego metodą addytywną DMLS (Próbka DMLS) oraz z pręta ciągnionego (Próbka PC), a także właściwości zmęczeniowych tego materiału. Ponadto badania obejmowały określenie cech geometrycznych próbek badawczych, chropowatości powierzchni

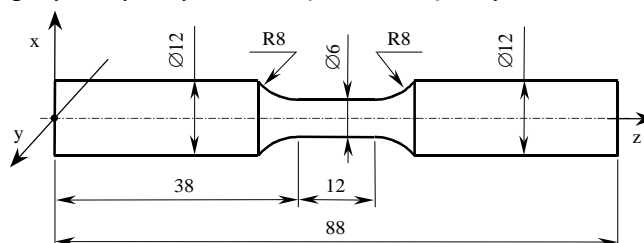
oraz twardości materiału. Wykonano także badania strukturalne stopu Ti6Al4V: makro- i mikroskopowe.



Rys. 3.1. Program badań własnych stopu tytanu Ti6Al4V : próbka DMLS – próbka wykonana metodą addytywną, próbka PC – próbka wykonana z pręta ciągniętego

3.2. OBIEKT BADAŃ

Obiekty badań w warunkach obciążeń statycznych oraz zmiennych stanowiły próbki wykonane według normy PN-74/H-04327 pt. „*Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania-ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych*”.



Rys. 3.2. Cechy geometryczne próbki do badań w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych

Wymiary geometryczne próbek zostały przedstawione na rysunku 3.2. Do badań przyjęto próbkę o przekroju okrągłym ze względu na występowanie w niej równomiernego rozkładu obciążeń podczas próby rozciągania. Jednym z czynników wpływających na równomierny rozkład obciążenia jest powtarzalny sposób montażu w uchwytach maszyny wytrzymałościowej, który zapewnia pokrycie się osi symetrii próbki z osią symetrii uchwytów maszyny. Równomierne obciążenie przekroju pozwala przyjąć założenie, że zmiany strukturalne w materiale w płaszczyźnie x-z i w płaszczyźnie y-z będą takie same. Pozwoli to na realizację badań strukturalnych tylko dla jednej z wymienionych płaszczyzn.

Próbki badawcze wykonano z materiału Ti6Al4V dwiema metodami: poprzez toczenia pręta ciągnionego o średnicy 12 mm (Próbka PC) oraz przy użyciu technologii addytywnej – Direct Metal Laser Sintering (Próbka DMLS). Następnie zastosowano obróbkę cieplną w celu uzyskania stabilnej struktury materiału, która polegała na wyżarzaniu próbek w temperaturze 840°C przez 1 godzinę, a następnie chłodzeniu do temperatury otoczenia.



Rys. 3.3. Postać fizyczna próbki do badań w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych wykonanych z pręta ciągnionego



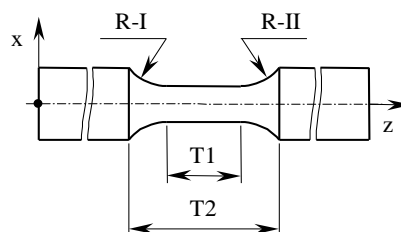
Rys. 3.4. Postać fizyczna próbki do badań w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych wykonanych technologią DMLS

Postać fizyczną próbki do badań statycznych i zmęczeniowych wykonanej z pręta ciągnionego przedstawiono na rysunku 3.3, natomiast technologią addytywną DMLS przedstawiono na rysunku 3.4.

3.3. OCENA GEOMETRYCZNA KSZTAŁTU PRÓBEK

3.3.1. Ocena kształtu próbek badawczych

Próbki badawcze poddano ocenie w zakresie wymaganego kształtu zgodnego z normą PN-84/H-04334 pt. „Badania niskocyklowego zmęczenia metali”. Ocenie poddano 20 próbek (10 próbek DMLS oraz 10 próbek PC). Pomiary dotyczyły określenia wybranych wymiarów geometrycznych tj. wartości promieni odsadzeń R-I i R-II oraz długości części roboczej T1, a także odległości części chwytowych próbki T2 (Rys. 3.5).



Rys. 3.5. Schematyczne określenie wybranych cech geometrycznych

Pomiaru wybranych cech geometrycznych próbek dokonano na urządzeniu Mitutoyo Formtracer SV-C3200. Stanowisko to przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Stanowisko do pomiarów geometrycznych Mitutoyo Formtracer SV-C3200

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w ujęciu statystycznym za pomocą parametrów: wartości średniej, odchylenia standardowego, wartości minimalnej i wartości maksymalnej (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Wyniki pomiarów wybranych cech geometrycznych próbek Ti6Al4V wytworzonych z pręta ciągnionego (próbka PC) oraz metodą DMLS (próbka DMLS)

	Wybrane parametry geometryczne próbek							
	Geometria próbek PC				Geometria próbek DMLS			
	R-I	R-II	T1	T2	R-I	R-II	T1	T2
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Wartość średnia	8,016	8,090	12,834	24,996	8,077	7,941	12,677	24,339
Odchylenie standardowe	0,071	0,316	0,354	0,058	0,183	0,176	0,131	0,103
Wartość minimalna	7,835	7,933	11,957	24,935	7,779	7,643	12,424	24,259
Wartość maksymalna	8,069	8,983	13,161	25,099	8,411	8,249	12,915	24,590

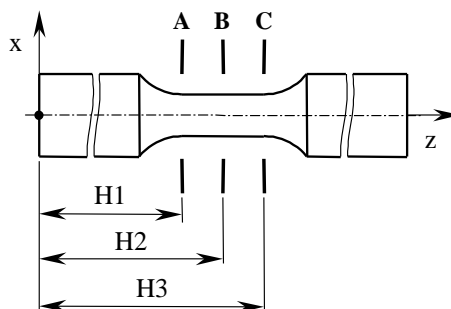
Istotnymi wymiarami próbek walcowych są wartości promieni odsadzeń, które decydują o wartości współczynnika spiętrzenia naprężeń wpływającego na postać uszkodzenia obiektów badań. Brak powtarzalności cech geometrycznych może wpłynąć na wartość wyznaczanych parametrów mechanicznych materiału Ti6Al4V. Przeprowadzone pomiary promieni odsadzeń próbek PC wskazują na powtarzalność wymiarową. Analizując wartość maksymalną promieni R-I i R-II różnica wartości wynosi 0,914 mm, co należy uznać za istotną różnicę. Różnica wartości promieni R-I (liczona jako różnica wartości maksymalnej i minimalnej) wynosi 0,234 mm, natomiast różnica wartości promienia R-II wynosi 1,05 mm.

Przeprowadzone pomiary promieni odsadzeń próbek DMLS wskazują, że charakteryzują się one powtarzalnością wymiarową. Analizując wartość maksymalną promieni R-I i R-II różnica wartości wynosi 0,162 mm. Różnica wartości promieni R-I (liczona jako różnica wartości maksymalnej i minimalnej) wynosi 0,632 mm, natomiast różnica wartości promienia R-II wynosi 0,606 mm. Próbkę DMLS cechują się powtarzalnością cech geometrycznych, co jest istotne w kontekście powtarzalności wyników badań doświadczalnych.

3.3.2. Pomiar średnicy części badawczej

Pomiaru średnicy oraz okrągłości części badawczej próbki dokonano na 10 próbkach DMLS oraz 10 próbkach PC. Dla każdej z próbek przeprowadzono pomiary w trzech

przekrojach zgodnie z rysunkiem 3.7. W nawiązaniu do rysunku określono trzy odległości od bazy pomiarowej $H_1=40$ mm, $H_2=43$ mm, $H_3=46$ mm. Pomiaru wartości średnic oraz okrągłości dokonano z użyciem urządzenia Mitutoyo CRYSTA-APEX S574 (Rys. 3.8).



Rys. 3.7. Schematyczne oznaczenie miejsc pomiaru średnic i okrągłości części badawczej próbki[130]



Rys. 3.8. Stanowisko do pomiaru okrągłości Mitutoyo CRYSTA-APEX S574

Tabela 3.2 przedstawia wyniki pomiarów w postaci następujących parametrów statystycznych: wartości średniej, odchylenia standardowego, wartości minimalnej i wartości maksymalnej.

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów okrągłości i średnicy części badawczej próbki

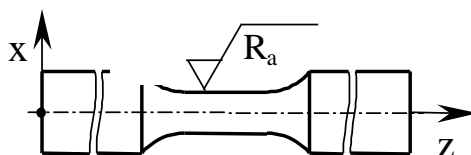
	Parametry geometryczne części pomiarowej próbki			
	Próbka PC		Próbka DMLS	
	średnica mm	okrągłość mm	średnica mm	okrągłość mm
Wartość Średnia	5,994	0,009	5,949	0,019
Odchylenie standardowe	0,007	0,004	0,004	0,004
Wartość minimalna	5,984	0,003	5,942	0,013
Wartość maksymalna	6,012	0,015	5,958	0,027

Przeprowadzone pomiary średnic części pomiarowej wykazały, że próbki DMLS oraz próbki PC mieszczą się w polu założonej tolerancji wymiarowej ($\pm 0,05$ mm) określonej w normie PN-76/H-04325. Porównując średnie wartości okrągłości dla próbek PC oraz DMLS można zauważyć, że próbki PC charakteryzują się mniejszą wartością parametru opisującego okrągłość. Także wartość średnia średnicy w przypadku próbki PC jest bliższa wartości

założonej średnicy nominalnej. Na tej podstawie można stwierdzić, że dzięki technologii toczenia uzyskano dokładniejsze wymiary próbki w porównaniu do DMLS. Dla próbek DMLS obserwuje się niższą różnicę między wartością minimalną, a maksymalną średnicy wynoszącą 0,016 mm. W przypadku próbek PC różnica ta wynosi 0.028 mm. Analiza rozkładu punktów pomiarowych dla poszczególnych przekrojów próbek DMLS dotyczących pomiaru okrągłości wskazuje na nieregularność kształtu w stosunku do okręgu nominalnego. W przypadku próbek PC wyniki pomiaru okrągłości wykazał regularność kształtu w badanych przekrojach.

3.3.3. Pomiar parametrów chropowatości

W oparciu o normę PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010 wyznaczono parametry chropowatości tj. parametr R_a , parametr R_z oraz parametr R_p . Podczas pomiarów chropowatości powierzchni ocenie podlegała jedna, określona długość odcinka próbki. Badania przeprowadzono na części pomiarowej próbki zgodnie z rysunkiem 3.9. Badania chropowatości powierzchni części pomiarowej próbek przeprowadzono przy użyciu profilografometru stacjonarnego Mahr MarSurf GD 120 (Rys. 3.10).



Rys. 3.9. Oznaczenie miejsca pomiaru chropowatości na próbkach [130]



Rys. 3.10. Stanowisko do pomiaru chropowatości powierzchni Mahr MarSurf GD 120

W tabeli 3.3 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości powierzchni części pomiarowej próbek PC oraz próbek DMLS. Parametry R_a , R_z oraz R_p zapisano przy użyciu parametrów statystycznych tj. wartość średnia, odchylenie standardowe, wartość minimalna i wartość maksymalna.

Tabela. 3.3. Wyniki pomiarów okrągłości i średnicy części badawczej próbki

	Parametry chropowatości próbki					
	Próbka PC			Próbka DMLS		
	R_a μm	R_z μm	R_p μm	R_a μm	R_z μm	R_p μm
Wartość średnia	0,275	1,544	0,805	1,898	11,880	5,585
Odchylenie standardowe	0,089	0,385	0,181	0,182	1,339	0,633
Wartość minimalna	0,161	1,132	0,617	1,607	9,988	4,593
Wartość maksymalna	0,428	2,096	1,120	2,187	13,987	7,132

Otrzymane wyniki badań wskazują, że wartość średnia parametrów chropowatości (tj. parametru Ra, Rz i Rp) jest wyższa dla próbek DMLS od wartości uzyskanych dla próbek PC. Różnice wynikają z tego, że próbka DMLS nie były poddane dodatkowej obróbce mechanicznej po ich wykonaniu. Taką postać próbek przyjęto do badań dlatego, gdyż elementy konstrukcyjne o złożonym kształcie wykonywane metodą DMLS nie są poddawane dodatkowej obróbce mechanicznej. Różnica procentowa średniej wartości parametrów chropowatości próbek DMLS w stosunku do próbek PC wynosi: dla Ra – 690,2 %, dla Rz – 769,4 %, dla Rp – 693,8 %. Analiza wartości maksymalnych wybranych parametrów chropowatości pozwoliła na określenie ich różnic procentowych wynoszących: dla Ra – 511,0 %, dla Rz – 667,3 %, dla Rp – 636,8 %. Analizując wartości minimalne wybranych parametrów określono ich różnice procentowe wynoszące: dla Ra – 998,1 %, dla Rz – 882,3 %, dla Rp – 744,4 %.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że parametr Rp najlepiej opisuje zmienność kształtu profilu części pomiarowej próbki. Wynika to z wartości różnic procentowych wskazanego parametru, które zmieniają się w najmniejszym zakresie dla analizy: wartości średniej, minimalnej i maksymalnej. Chropowatość powierzchni wpływa w nieznacznym stopniu na wyniki badań wytrzymałości mechanicznej. Natomiast jej znaczenie rośnie przy badaniach trwałości zmęczeniowej, gdyż w przypadku wzrostu parametru chropowatości łatwiej o inicjację pęknięć elementu.

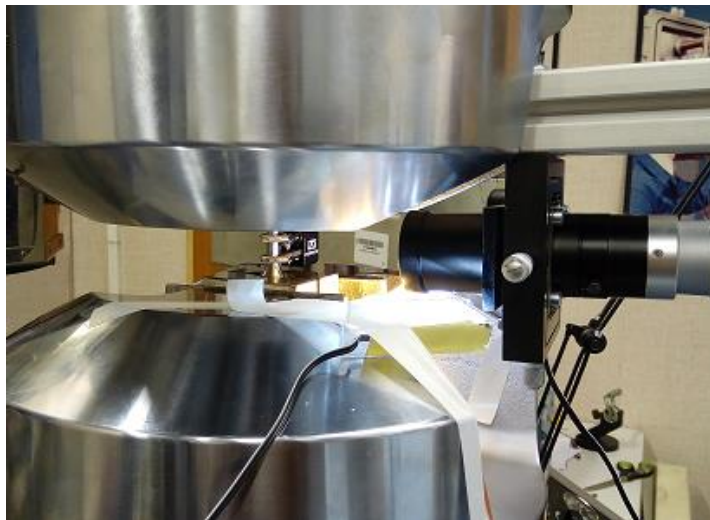
3.4. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH

W ramach badań przeprowadzono statyczną próbę rozciągania zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 6892-1:2016, pt. „*Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*”, na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8502 (Rys. 3.11a).

a)



b)

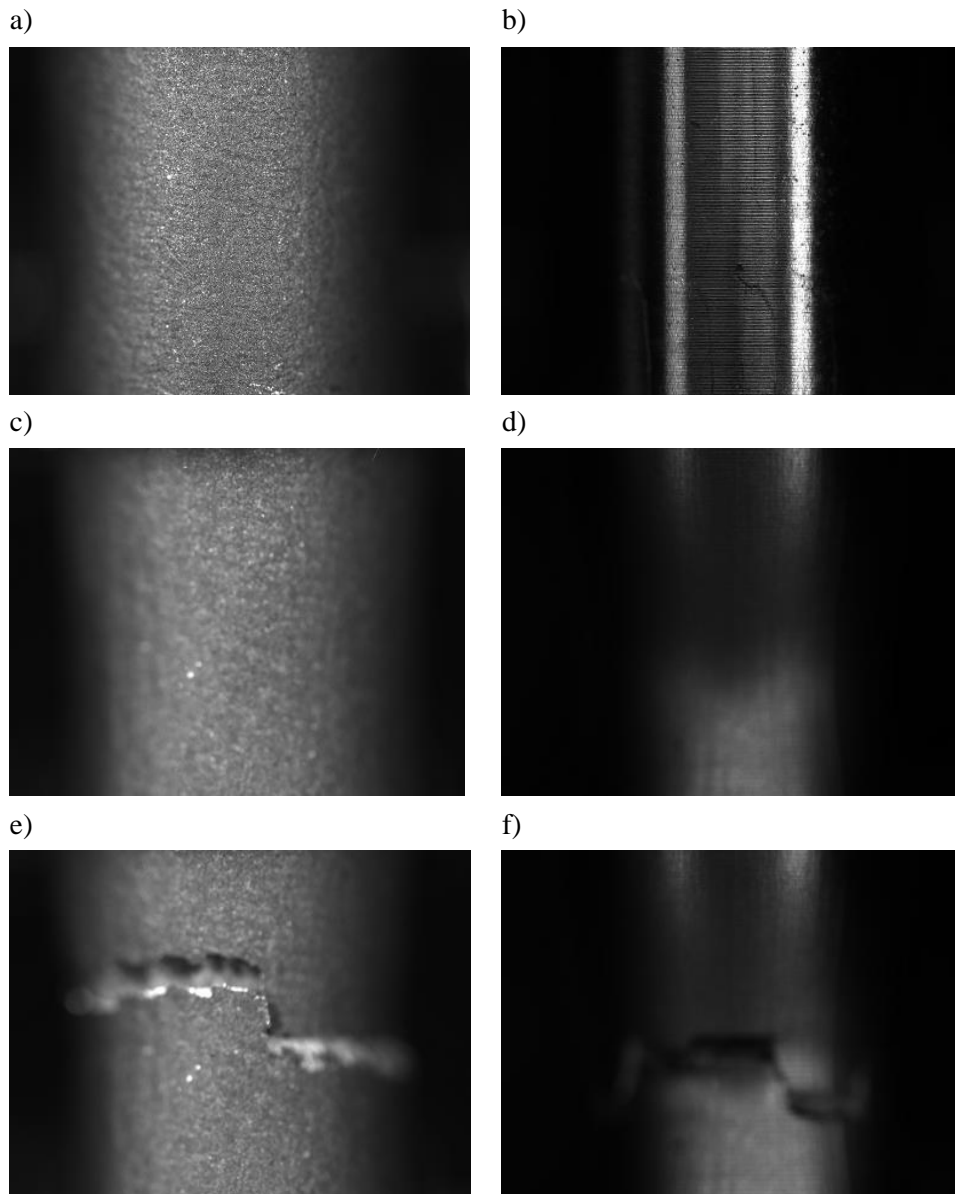


Rys. 3.11. Stanowisko badawcze: a) maszyna wytrzymałościowa, b) kamera BASLER acA4024-8gm do pomiaru odkształcenia

Zarejestrowane w trakcie badań zdjęcia poddano analizie przemieszczenia z użyciem oprogramowania Pylon firmy BASLER. Program ten porównywał wszystkie zdjęcia wykonane w trakcie trwania próby do obrazu referencyjnego. Analiza ta polegała na określeniu położenia

danego piksela na obrazie referencyjnym i ustaleniu przemieszczenia się tego punktu na kolejnych zdjęciach.

Na rysunku 3.12 zamieszczono przykładowe zdjęcia wykonane kamerą BASLER acA4024-8gm w trakcie statycznej próby rozciągania dla dwóch typów próbek. Rysunki 3.12a, 3.12c oraz 3.12e przedstawia próbkę DMLS, natomiast na rysunkach 3.12b, 3.12d, 3.12f przedstawiono próbkę PC.

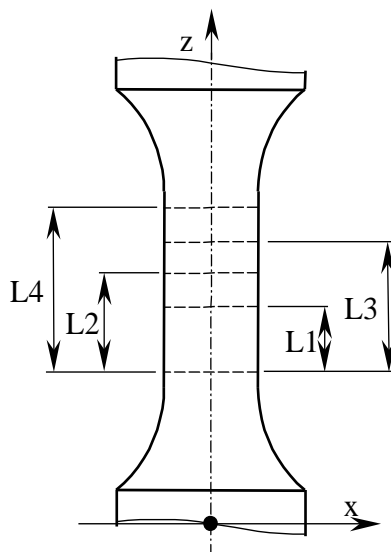


Rys. 3.12. Zdjęcia wykonywane przy użyciu kamery BASLER acA4024-8gm w trakcie statycznej próby rozciągania zrobione: a) próbki DMLS przed rozpoczęciem próby (obraz referencyjny), b) próbki PC przed rozpoczęciem próby (obraz referencyjny), c) próbki DMLS tuż przed zerwaniem, d) próbki PC tuż przed zerwaniem e) próbki DMLS tuż po zerwaniu, f) próbki PC tuż po zerwaniu

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu wyznaczono następujące właściwości mechaniczne materiału: wytrzymałość na rozciąganie R_e , umowną granicę plastyczności $R_{p0.2}$, moduł Younga E oraz wydłużenie A .

Na rysunku 3.13 w sposób schematyczny przedstawiono obszar na próbce podlegający analizie przemieszczeń. Na obszarze tym zaznaczono cztery bazy pomiarowe, z których trzy

służyły do wyznaczenia lokalnych właściwości materiału za pomocą cyfrowej korelacji obrazu oraz jeden zakres pomiarowy dla klasycznego ekstensometru. Bazy pomiarowe dla cyfrowej korelacji obrazu wynoszą: $L1 = 1,36$ mm, $L2 = 2,72$ mm, $L3 = 3,49$ mm, natomiast dla ekstensometru zakres ten wyniósł $L4 = 10$ mm.



Rys. 3.13. Schematyczne przedstawienie obszarów poddawanych analizie przy pomocy metody cyfrowej korelacji obrazu, dla których bazy pomiarowe wynosiły: $L1 = 1,36$ mm, $L2 = 2,72$ mm, $L3 = 3,49$ mm (DIC), $L4 = 10$ mm (pomiar za pomocą ekstensometru)

Wartości wybranych parametrów wytrzymałościowych uzyskanych dla próbek DMLS przedstawiono w tabeli 3.4, natomiast wyniki dla próbek PC zamieszczono w tabeli 3.5.

Tabela 3.4. Zestawienie wybranych parametrów wytrzymałościowych stopu tytanu Ti6Al4V wytworzonego metodą DMLS w warunkach obciążeń statycznych rozciągających

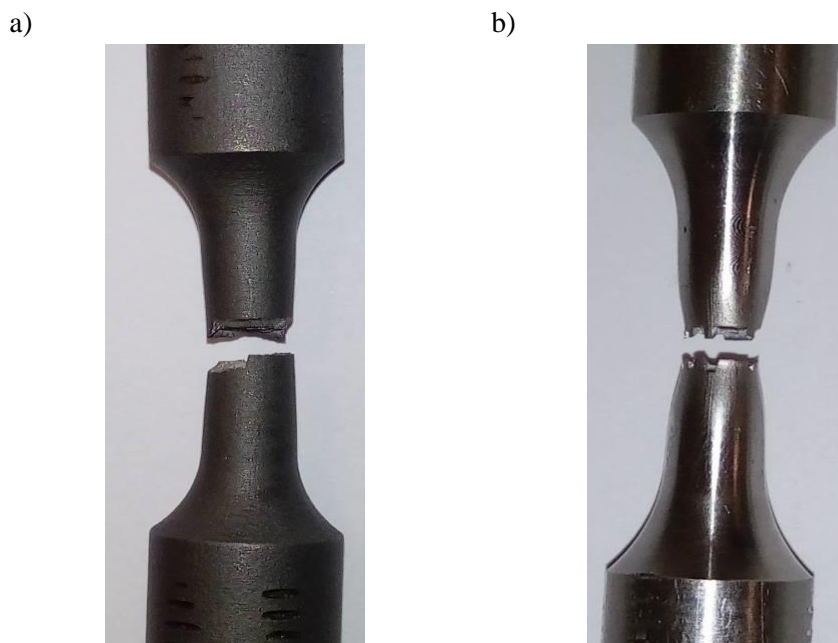
Baza pomiarowa		Wartości średnie wybranych parametrów wytrzymałościowych				
		$R_{p0,2}$	R_m	E	A	Z
		MPa	MPa	MPa	%	%
DIC	$L1 = 1,36$ mm	1089	1140	115300	23,5	19,2
	$L2 = 2,72$ mm	1091	1140	115020	23,3	19,2
	$L3 = 3,49$ mm	1096	1140	112950	21,2	19,2
Ekstensometr	$L4 = 10$ mm	1086	1121	119610	16,9	19,2

Tabela 3.5. Zestawienie wybranych parametrów wytrzymałościowych stopu tytanu Ti6Al4V w postaci pręta ciągniętego w warunkach obciążeń statycznych rozciągających

Baza pomiarowa		Wartości średnie wybranych parametrów wytrzymałościowych				
		$R_{p0,2}$	R_m	E	A	Z
		MPa	MPa	MPa	%	%
DIC	$L1 = 1,36$ mm	1006	1044	103880	38,2	47,3
	$L2 = 2,72$ mm	1008	1044	95316	39,4	47,3
	$L3 = 3,49$ mm	1008	1044	89234	35,4	47,3
Ekstensometr	$L4 = 10$ mm	1004	1042	106940	28,3	47,3

Na rysunku 3.14 przedstawiono próbki po zerwaniu. Na ich podstawie stwierdzono, że próbka PC w miejscu pęknięcia posiada widoczne przewężenie, natomiast próbka DMLS charakteryzuje się jego brakiem. W przypadku próbki drukowanej postać uszkodzenia odpowiada pękaniu przebiegającemu pomiędzy kolejnymi warstwami spiekane materiału

powstałymi w trakcie procesu druku. Uszkodzenie próbki toczonyj wykonanej z pręta ciągnionego ma charakter sprężysto-plastyczny.



Rys. 3.14. Postać uszkodzenia próbek w wyniku rozciągania: a) próbek DMLS, b) próbek PC

Z danych uzyskanych w trakcie statycznej próby rozciągania wynika, że właściwości mechaniczne takie jak: umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m , a także wartość wydłużenia A uzyskane dla ekstensometru wykazują niższe wartości w porównaniu do wyników otrzymanych dla metody cyfrowej korelacji obrazu. Statyczna próba rozciągania z użyciem ekstensometru dla próbek DMLS oraz próbek PC wykazały różnicę w wartościach modułu Younga E . Wynikają one z różnych technologii produkcji materiałów. Porównując wyniki modułu Younga dla próbek DMLS, wartości uzyskane dla różnych baz pomiarowych są podobne. Wskazuje to na równomierne odkształcenie warstw elementu wykonanego metodą DMLS. Różnice w wartości granicy plastyczności są niewielkie i mieszczą się w granicach niepewności pomiaru. W przypadku próbek PC zaobserwowano znaczące różnice w wartościach modułu Younga dla różnych zakresów pomiarowych metody DIC. Zakłada się, że uzyskane wyniki są związane z lokalnie zmieniającymi się właściwościami próbki. Zakłada się również, że metoda pomiaru DIC mogła mieć wpływ na wyniki modułu Younga wyznaczonego dla próbek PC. Metoda ta opiera się na analizowaniu obrazów powierzchni próbki. Mała chropowatość powierzchni może wpływać na odczyty wartości przemieszczeń, co przyczynia się do uzyskania określonych wyników.

3.5. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ ZMIENNYCH

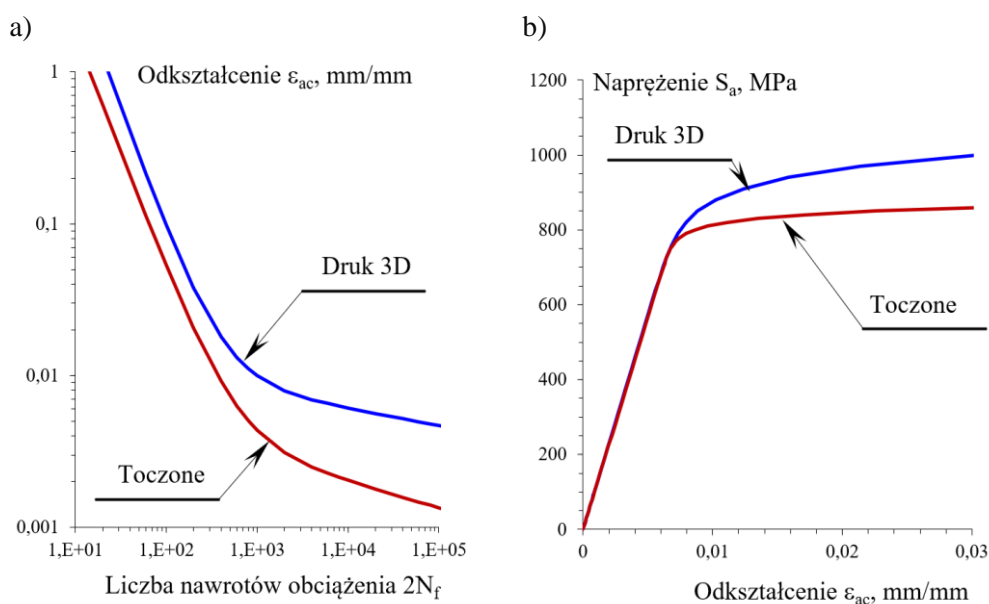
3.5.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze w trakcie badań trwałości zmęczeniowej stanowiła maszyna wytrzymałościowa Instron 8502. Wartość odkształceń rejestrowana była za pomocą klasycznego ekstensometru Instron 2620-601 o bazie pomiarowej 10 mm i zakresie pomiaru 1 mm. Stanowisko badawcze przestawiono na rysunku 3.11.

3.5.2. Badania w warunkach obciążeń stałoamplitudowych R=-1

Badania zmęczeniowe zrealizowano w warunkach obciążeń zmiennych stałoamplitudowych R=-1. Parametrem sterującym próby była wartość odkształcenia z zakresu $\varepsilon = 0,5 \div 0,8 \%$.

Na rysunku 3.15a przedstawiono zestawienie wykresów trwałości zmęczeniowej próbek DMLS oraz próbki PC wyznaczonych na podstawie badań w warunkach obciążeń zmiennych przy sterowaniu odkształceniem. W tabeli 3.6 zamieszczono parametry opisujące wyżej wymienione wykresy tj. współczynnik odkształcenia plastycznego c, wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej b, współczynnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego ε_f' , współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej σ_f' oraz moduł Younga E. Na rysunku 3.15b zestawiono natomiast wykresy cyklicznego odkształcenia próbek DMLS oraz PC wyznaczonych na podstawie badań w warunkach obciążeń zmiennych przy sterowaniu odkształceniem. Parametry opisujące przedstawione wykresy zamieszczono w tabeli 3.8. Określono wykładnik cyklicznego umocnienia n' oraz współczynnik cyklicznego umocnienia dla obu rodzajów próbek.



Rys. 3.15. Wykresy dla próbek DMLS oraz PC: a) wykres trwałości zmęczeniowej, b) wykres cyklicznego odkształcenia

Tabela 3.6. Parametry opisujące wykresy trwałości zmęczeniowej materiału Ti6Al4V

Nazwa próbki	Parametr				
	c	b	ε_f'	σ_f'	E
	-	-	%	MPa	MPa
Próbka DMLS	-1,6335	-0,1139	163,6	1980,7	114510
Próbka PC	-1,5487	-0,1742	61,3	1125	113060

Z wykresu zamieszczonego na rysunku 3.15a wynika, że dla takiej samej liczby nawrotów próbka DMLS wykonana metodą druku 3D przyjmuje wyższe wartości odkształcenia w porównaniu do próbki PC. Ma to swoje odzwierciedlenie w parametrach

zawartych w tabeli 3.6, gdzie wartość współczynnika zmęczeniowego odkształcenia plastycznego dla próbki DMLS jest o 100 % wyższa niż dla próbki PC.

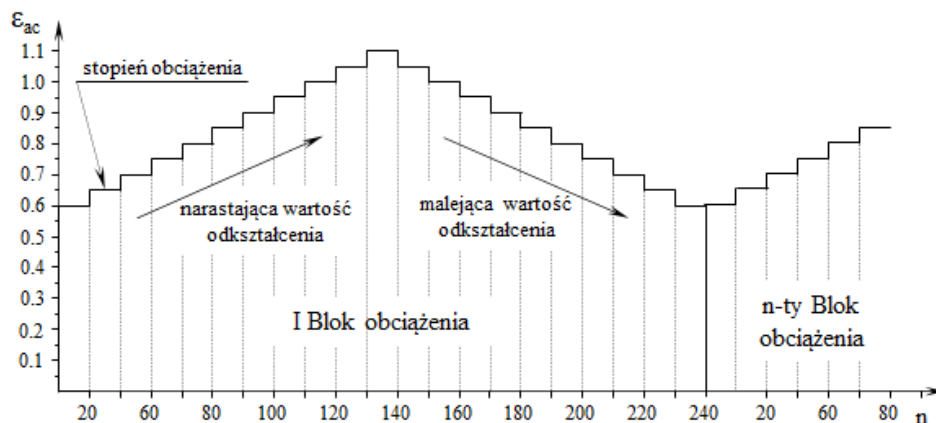
Tabela 3.7. Parametry opisujące wykresy cyklicznego odkształcenia materiału Ti6Al4V

Nazwa próbki	Parametr	
	K'	n'
	MPa	-
Próbka DMLS	1258,1	0,0598
Próbka PC	949,8	0,0265

Z wykresu 3.15b wynika, że materiał Ti6Al4V wytworzony metodą addytywną DMLS posiada wyższe parametrami odkształceniowe. Zauważa się podobną zależność jak w przypadku wyników badań zmęczeniowych w warunkach obciążeń programowanych. Dla tych samych wartości odkształceń próbka DMLS osiąga wyższe wartości amplitudy naprężenia. Wraz ze wzrostem wartości odkształcenia zwiększa się różnica osiąganych wartości amplitudy naprężenia.

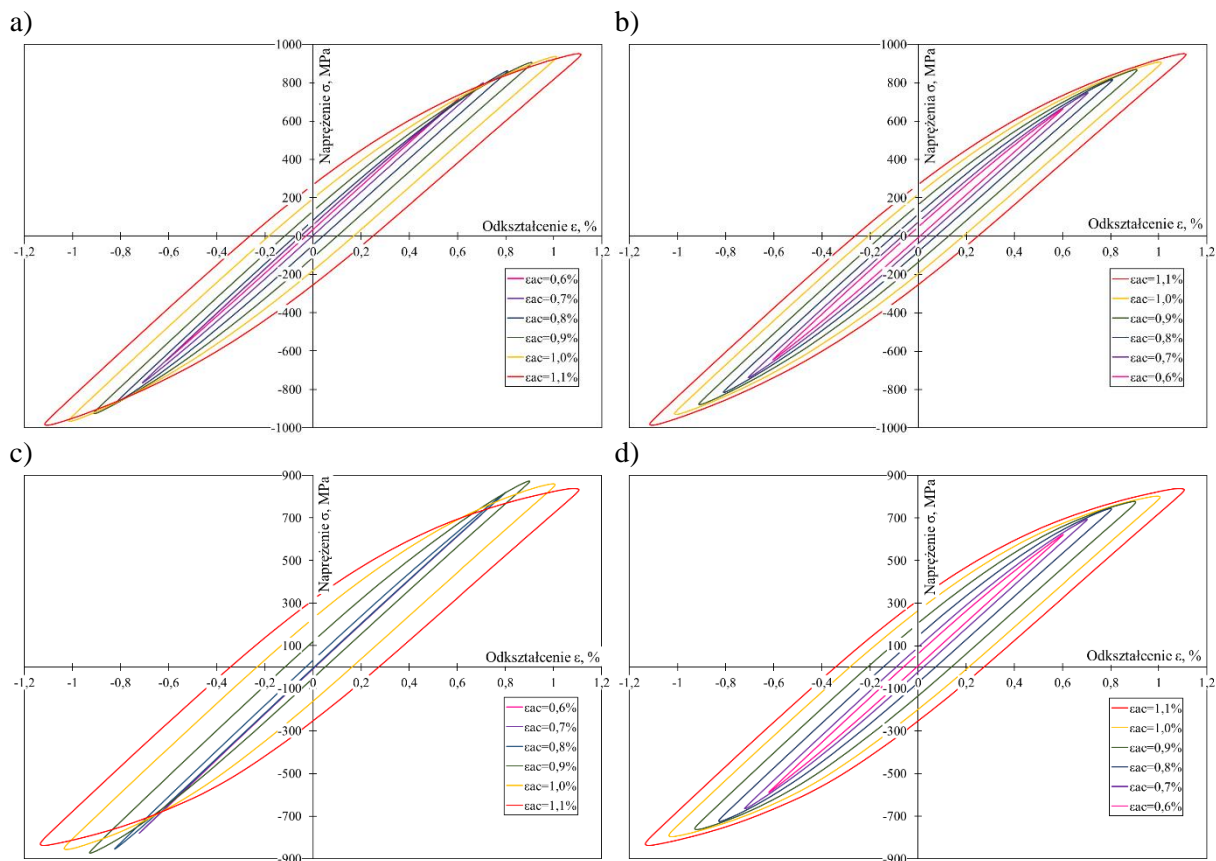
3.5.3. Badania w warunkach obciążeń programowanych Lo-Hi-Lo

Badania w warunkach obciążeń programowanych realizowane były w oparciu o sterowanie odkształceniem na jedenastu poziomach. Program badań zamieszczono na rysunku 3.16. Składał się on z siedmiu narastających poziomów, gdzie wejściowa wartość odkształcenia wynosiła 0,6 % i zmieniała się o 0,05 % co 20 cykli do osiągnięcia maksimum równego 1,1 %. Następnie wartości odkształcenia malały o 0,05 % co 20 cykli osiągając minimum równe 0,6 %. Cały blok obciążenia był powtarzany aż do momentu pęknięcia próbki.



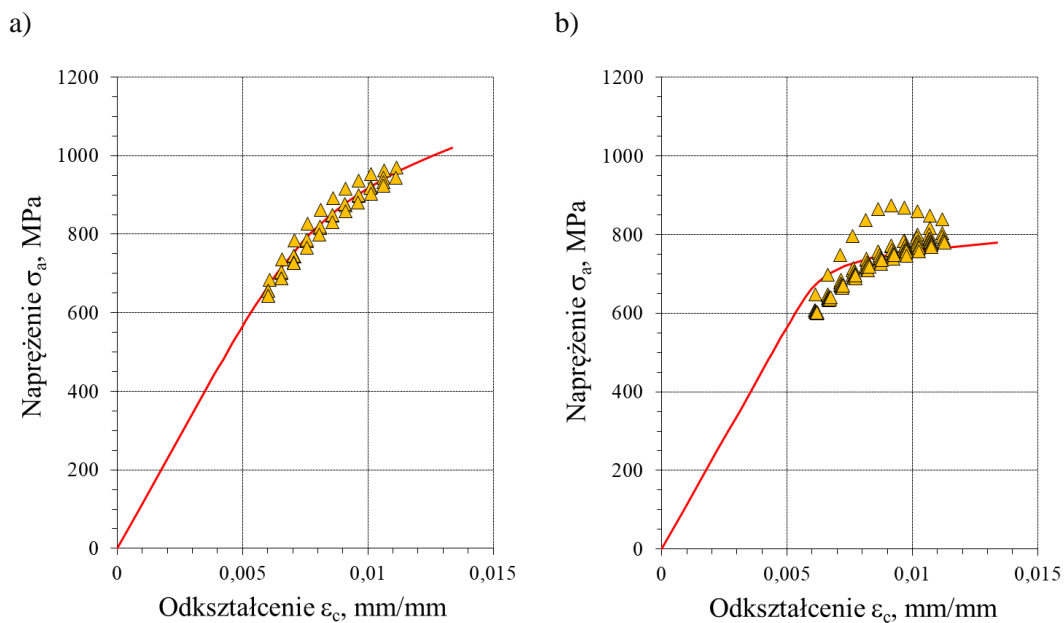
Rys. 3.16. Program badań Lo-Hi-Lo

Na rysunku 3.17 zamieszczono pętle histerezy stopu Ti6Al4V (próbka DMLS oraz próbka PC) dla pierwszego bloku programu badań uwzględniając wybrane poziomy odkształcenia. Na rysunku 3.17a zestawiono pętle naprężeniowo-odkształceniowe dla próbki DMLS dla rosnącej wartości amplitudy odkształcenia, natomiast na rysunku 3.17b dla malejącej wartości odkształcenia. Na rysunku 3.17c zestawiono pętle odkształceniowo-naprężeniowe dla próbki PC dla rosnącej wartości amplitudy odkształcenia, natomiast na rysunku 3.17d dla malejącej wartości odkształcenia.



Rys. 3.17. Przykładowe pętle histerezy występujące w jednym bloku programu dla: a) rosnącej wartości odkształcenia Próbka DMLS, b) malejącej wartości odkształcenia Próbka DMLS, c) rosnącej wartości odkształcenia Próbka PC, d) malejącej wartości odkształcenia Próbka PC

Na rysunku 3.18 zamieszczono wykresy cyklicznego odkształcenia uzyskane na podstawie badań programowanych dla próbki DMLS (Rys. 3.1a) oraz próbki PC (Rys. 3.18b). Parametry opisujące wykresy cyklicznego odkształcenia zestawiono w tabeli 3.9.



Rys. 3.18. Wykresy cyklicznego odkształcenia: a) dla próbki DMLS, b) dla próbki PC

Tabela 3.9. Parametry opisujące wykresy cyklicznego odkształcenia materiału Ti6Al4V

Nazwa próbki	Parametr	
	K'	n'
	MPa	-
Próbka DMLS	2082,8	0,1319
Próbka PC	959,9	0,0412

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że materiał Ti6Al4V wytworzony metodą addytywną DMLS cechuje się wyższymi parametrami odkształceniowymi tj. współczynnik cyklicznego umocnienia K' oraz wykładnik cyklicznego umocnienia n' . Można zauważyć, że dla tych samych wartości odkształceń próbka DMLS osiąga wyższe wartości amplitudy naprężenia. Wraz ze wzrostem wartości odkształcenia zwiększa się różnica osiąganych wartości amplitudy naprężenia.

3.6. BADANIA TWARDOŚCI MATERIAŁU

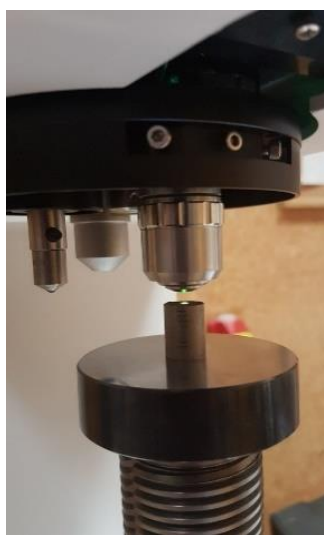
3.6.1. Stanowisko do badań

Próbki DMLS i PC poddano badaniom twardości metodą Vickersa według normy PN-EN ISO 6507-1:2018-05, pt. „*Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badania*”. Badania twardości metodą Vickersa przeprowadzono z zastosowaniem twardościomierza HV-10 firmy HUATEC (Rys. 3.19). Podczas badań stosowano wgłębnik w postaci czworobocznego foremnego ostrosłupa diamentowego o kącie wierzchołkowym 136° . Obciążenie pomiarowe wynosiło $F = 49,03 \text{ N}$, co pozwoliło na wyznaczenie twardości w skali HV5. Czas działania obciążenia pomiarowego wynosił 10 s.

a)



b)



Rys. 3.19. Twardościomierz HUATEC HV-10: a) widok przyrządu, b) widok próbki podczas badań

3.6.2. Wyniki badań

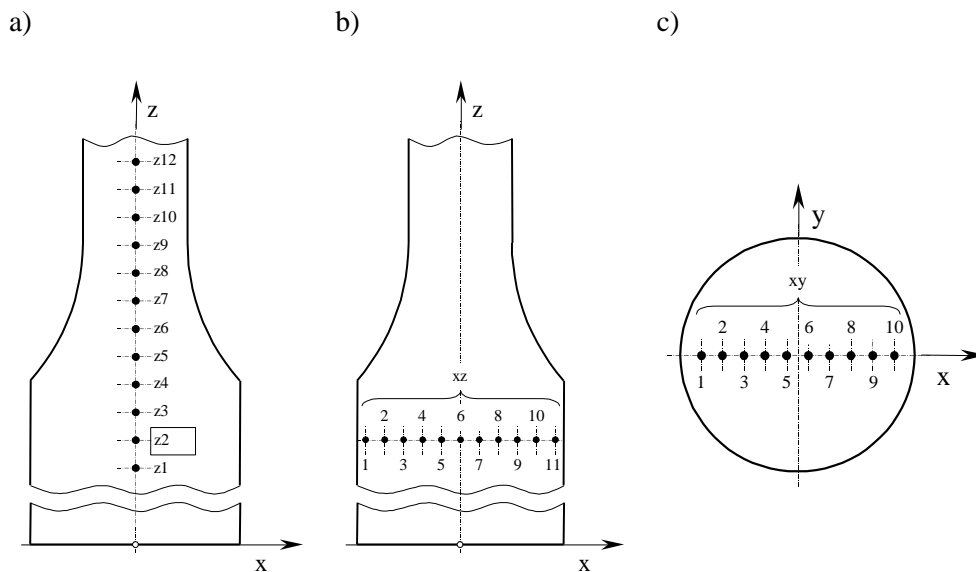
Próbki do badań twardości przygotowano z obiektów niepoddanych obciążeniu oraz próbek uszkodzonych (zerwanych) w wyniku przeprowadzonej próby rozciągania:

- a) próbka PC przed obciążeniem (próbka PC-1),
- b) próbka PC po badaniach statycznych (próbka PC-2),

- c) próbka DMLS przed obciążeniem (próbka DMLS-1),
- d) próbka DMLS po badaniach statycznych (próbka DMLS-2).

Pomiary twardości przeprowadzono na przygotowanych próbkach zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.20. Uzyskane wyniki badań:

- a) próbki PC przed obciążeniem przedstawiono w tabeli 3.10,
- b) próbki PC po wykonanych badaniach w warunkach obciążeń statycznych przedstawiono w tabeli 3.11,
- c) próbki DMLS przed obciążeniem przedstawiono w tabeli 3.12,
- d) próbki DMLS po wykonanych badaniach w warunkach obciążeń statycznych przedstawiono w tabeli 3.13.



Rys. 3.20. Schematyczne przedstawienie punktów pomiaru twardości na przekroju próbki: a) wzdłuż osi z, b) w części chwytowej próbki na płaszczyźnie x-z, c) w części chwytowej na płaszczyźnie x-y

Tabela 3.10. Wyniki pomiaru twardości metodą Vickersa próbek PC przed obciążeniem (oznaczenie: Próbką PC-1)

Lp.	Pomiar twardości metodą Vickersa (HV5)											
	wzdłuż osi z					na płaszczyźnie x-z			na płaszczyźnie x-y			
	Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru		
		I	II	III		I	II	III		I	II	III
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	z1	350,0	342,5	355,5	xz1	360,0	353,5	360,0	xy1	343,5	386,0	340,5
2	z2	345,5	376,0	363,0	xz2	354,0	374,0	345,0	xy2	343,5	361,0	345,0
3	z3	351,0	365,5	362,0	xz3	364,5	357,5	345,5	xy3	341,5	372,5	338,5
4	z4	347,5	345,5	350,0	xz4	345,5	363,0	353,5	xy4	323,5	347,0	331,5
5	z5	354,0	384,5	343,5	xz5	347,5	364,5	357,5	xy5	330,5	374,5	342,5
6	z6	343,5	364,5	351,0	xz6	347,5	369,0	352,0	xy6	325,5	391,0	341,5
7	z7	355,5	391,0	354,0	xz7	354,0	356,5	347,5	xy7	326,5	371,5	343,5
8	z8	349,0	354,0	345,0	xz8	362,0	352,0	350,0	xy8	341,5	367,5	343,5
9	z9	351,0	369,0	351,0	xz9	360,0	381,0	360,0	xy9	339,5	379,5	347,0
10	z10	354,0	400,0	357,5	xz10	357,5	381,0	364,5	xy10	345,0	357,5	350,0
11	z11	345,0	387,0	355,5	xz11	360,0	349,0	350,0				
12	z12	347,5	351,0	360,0								

Tabela. 3.11. Wyniki pomiaru twardości metodą Vickersa próbek PC po badaniach statycznych (oznaczenie: Próbką PC-2)

Lp.	Pomiar twardości metodą Vickersa (HV5)											
	wzdłuż osi z				na płaszczyźnie x-z				na płaszczyźnie x-y			
	Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru		
	I	II	III	I		II	III	I		II	III	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	z1	358,5	358,5	358,5	xz1	393,5	351,0	381,0	xy1	360,0	327,5	363,0
2	z2	341,5	363,0	358,5	xz2	370,0	352,0	374,0	xy2	360,0	336,5	354,0
3	z3	352,0	356,5	354,0	xz3	372,5	381,0	370,0	xy3	362,0	341,5	347,0
4	z4	345,5	347,5	345,5	xz4	372,5	371,5	367,0	xy4	363,0	339,5	343,5
5	z5	357,5	353,5	374,5	xz5	369,0	370,0	365,5	xy5	356,5	339,5	362,0
6	z6	362,0	354,0	347,0	xz6	369,0	374,0	377,0	xy6	350,0	342,5	356,5
7	z7	367,5	357,5	351,0	xz7	359,5	374,0	361,0	xy7	350,0	332,5	350,0
8	z8	360,0	371,5	374,0	xz8	371,5	360,0	372,5	xy8	349,0	333,5	350,0
9	z9	381,0	356,5	374,0	xz9	370,0	361,0	362,0	xy9	360,0	337,5	341,5
10	z10	384,5	370,0	394,5	xz10	374,0	353,5	370,0	xy10	362,0	336,5	351,0
11	z11	386,0	372,5	386,0	xz11	372,5	364,5	361,0				
12	z12	370,0	367,0	393,5								

Tabela 3.12. Wyniki pomiaru twardości metodą Vickersa próbek DMLS przed obciążeniem (oznaczenie: Próbką DMLS-1)

Lp.	Pomiar twardości metodą Vickersa (HV5)											
	wzdłuż osi z				na płaszczyźnie x-z				na płaszczyźnie x-y			
	Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru		
	I	II	III	I		II	III	I		II	III	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	z1	400,0	413,0	410,0	xz1	400,5	393,5	399,5	xy1	385,5	364,5	392,5
2	z2	401,0	371,5	375,5	xz2	395,5	386,0	400,0	xy2	361,0	381,0	388,5
3	z3	392,0	389,5	381,5	xz3	392,0	391,0	382,0	xy3	394,5	391,0	381,0
4	z4	409,5	393,5	380,0	xz4	399,5	384,5	388,5	xy4	386,5	384,5	379,5
5	z5	399,0	398,5	388,5	xz5	399,0	393,5	381,5	xy5	402,0	383,5	371,0
6	z6	398,0	402,5	401,0	xz6	399,5	397,0	375,5	xy6	392,5	382,0	384,5
7	z7	396,5	396,0	405,0	xz7	407,5	392,0	399,0	xy7	396,0	379,5	380,0
8	z8	392,0	393,5	375,5	xz8	400,0	386,0	390,5	xy8	391,0	382,0	375,5
9	z9	402,5	383,5	390,0	xz9	401,0	406,5	389,5	xy9	393,5	382,0	385,5
10	z10	390,5	382,0	393,0	xz10	407,0	405,0	389,5	xy10	390,0	388,5	395,0
11	z11	384,0	392,0	384,0	xz11	400,0	392,0	403,5				
12	z12	399,0	387,0	405,0								

Tab. 3.13. Wyniki pomiaru twardości metodą Vickersa próbek DMLS po badaniach statycznych (oznaczenie: Próbką DMLS-2)

Lp.	Pomiar twardości metodą Vickersa (HV5)											
	wzdłuż osi z				na płaszczyźnie x-z				na płaszczyźnie x-y			
	Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru			Nr	Nr pomiaru		
	I	II	III	I		II	III	I		II	III	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	z1	405,0	425,5	429,0	xz1	421,5	409,5	436,0	xy1	401,5	420,5	400,0
2	z2	420,5	436,0	396,0	xz2	453,5	448,5	409,5	xy2	426,0	433,0	415,0
3	z3	423,5	424,5	401,5	xz3	436,0	420,5	420,5	xy3	402,5	438,0	406,5
4	z4	448,5	439,0	429,0	xz4	439,0	447,0	416,0	xy4	391,0	406,5	430,5
5	z5	423,5	432,0	426,0	xz5	419,0	424,5	444,0	xy5	409,5	408,0	410,5
6	z6	398,5	432,0	412,0	xz6	401,5	325,5	447,0	xy6	427,5	436,0	415,0
7	z7	408,0	424,5	421,5	xz7	416,0	444,0	432,0	xy7	401,5	432,0	433,0
8	z8	432,0	448,5	420,5	xz8	420,5	436,0	433,0	xy8	417,5	420,5	405,0
9	z9	438,0	432,0	408,0	xz9	415,0	442,0	424,5	xy9	408,0	410,5	401,5
10	z10	421,5	450,5	439,0	xz10	416,0	421,5	445,5	xy10	427,5	402,5	408,0
11	z11	402,5	433,0	415,0	xz11	421,5	409,5	408,0				
12	z12	412,0	420,5	398,5								

Analizując wyniki badań twardości próbek DMLS-1 oraz PC-1 zauważa się, że wartość średnia twardości dla próbki DMLS-1 wzdłuż osi Z jest wyższa o 35,6 HV5, na płaszczyźnie x-z o 37,3 HV5, na płaszczyźnie x-y o 35,1 HV5. Próbka PC-1 charakteryzuje się większym rozstępem danych w porównaniu do próbki DMLS-1 wzdłuż osi Z ~ 16 , na płaszczyźnie x-z ~ 4 oraz na płaszczyźnie x-y $\sim 26,5$. Różnice te wynikają z zupełnie różnych procesów wytwarzania, a co z tym związane odmiennej struktury analizowanych próbek. Wyższe wartości średnie twardości dla próbki DMLS-1 pokazują, że rodzaj technologii wytwarzania elementów znacząco wpływa na uzyskane wyniki twardości.

Porównując wartość średnią dla próbek DMLS-2 oraz PC-2 wzdłuż osi Z można zauważyć, że uzyskane wyniki są wyższe o 59,0 HV5 dla próbki DMLS-2. Wartość średnia wyników badań twardości dla próbki DMLS-2 jest wyższa na płaszczyźnie x-z o 58,7 HV5, a na płaszczyźnie x-y o 68 HV5 niż dla próbki PC-2. Niższe odchylenie standardowe i mniejszy rozstęp wyników świadczą o większej jednorodności struktury próbek wykonanych z pręta ciągnionego po przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych. Natomiast w przypadku próbki DMLS-2 próba rozciągania wpłynęła na pogorszenie się struktury i jej niejednorodność. Poniżej zestawiono względną różnicę wartości średnich HV5 dla różnych zestawień próbek:

- wzdłuż osi Z dla próbki:
 - PC-1 i PC-2 $\Delta HV = 1,81 \%$,
 - DMLS-1 i DMLS-2 $\Delta HV = 7,57 \%$,
 - DMLS-1 i PC-1 $\Delta HV = 9,07 \%$,
 - DMLS-2 i PC-2 $\Delta HV = 13,94 \%$,
- na płaszczyźnie x-z:
 - PC-1 i PC-2 $\Delta HV = 3,12 \%$,
 - DMLS-1 i DMLS-2 $\Delta HV = 8,26 \%$,
 - DMLS-1 i PC-1 $\Delta HV = 9,43 \%$,
 - DMLS-2 i PC-2 $\Delta HV = 13,73 \%$,
- na płaszczyźnie x-y:
 - PC-1 i PC-2 $\Delta HV = 0,32 \%$,
 - DMLS-1 i DMLS-2 $\Delta HV = 7,80 \%$,
 - DMLS-1 i PC-1 $\Delta HV = 9,11 \%$,
 - DMLS-2 i PC-2 $\Delta HV = 15,97 \%$.

Analiza wzdłuż osi Z, na płaszczyźnie x-z oraz x-y pokazała, że najmniejszą względną różnicą wartości charakteryzują się próbki PC. Statyczna próba rozciągania w nieznaczny sposób wpłynęła na zmianę twardości próbek PC. Większą różnicę zmian wartości średniej obserwuje się między próbkami DMLS. Pokazuje to, że siły działające w trakcie próby rozciągania wpływają na zwiększenie się twardości materiału i zmianę jego mikrostruktury. Różnice twardości między próbkami PC a DMLS przed rozciąganiem pokazują, że obie próbki wykazują różne struktury, a proces wytwarzania materiału może wpłynąć na uzyskanie różnych właściwości materiału.

Z przedstawionych danych wynika, że największe różnice twardości między płaszczyznami uzyskano dla próbki PC-2. Siły występujące podczas badania wpłynęły na wystąpienie odkształceń plastycznych, które wpłynęły na wydłużenie się ziaren w kierunku osi Z. Próbka DMLS-2 wykazała niższą różnicę między wartościami uzyskanymi na obu płaszczyznach. Mógł mieć na to wpływ fakt, że próbki drukowane charakteryzowały się mniejszą plastycznością i były mniej podatne na zmiany w strukturze całej próbki. Różnice wartości dla próbki PC-1 oraz DMLS-1 były zbliżone do siebie. Porównując wartości uzyskane na płaszczyźnie x-z dla wszystkich próbek są one wyższe niż te uzyskane na płaszczyźnie x-y.

3.7. BADANIA STRUKTURY MATERIAŁU

3.7.1. Badania mikrostruktury

Do oceny makrostruktury użyto mikroskopu stereoskopowego SMZ-168 firmy: MOTIC wyposażonego w kamerę cyfrową Deltapix (Rys. 3.21a). Badania mikroskopowe wykonano na mikroskopie prostym Nikon Eclipse LV150N z kamerą cyfrową Imagesource (Rys. 3.21b).

a)



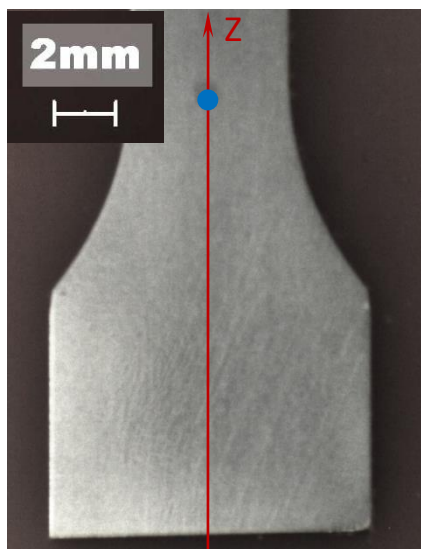
b)



Rys. 3.21. Stanowisko do badań: a) makrostruktury, b) mikrostruktury

Badania przeprowadzono na zglądach pobranych z próbek z części chwytowej oraz pomiarowej pobrano, które posłużyły do wykonania zdjęć mikrostruktur badanych materiałów. Zglądy pobrano zarówno z próbek nie poddanych badaniom jak i tych wykorzystanych w statycznej próbie rozciągania oraz badaniach trwałości zmęczeniowej. Poniżej przedstawiono zdjęcia makro- oraz mikrostrukturalne zglądów pobranych wzdłuż osi Z. Rysunek 3.22 przedstawia próbkę PC, natomiast rysunek 3.23 próbkę DMLS.

a)



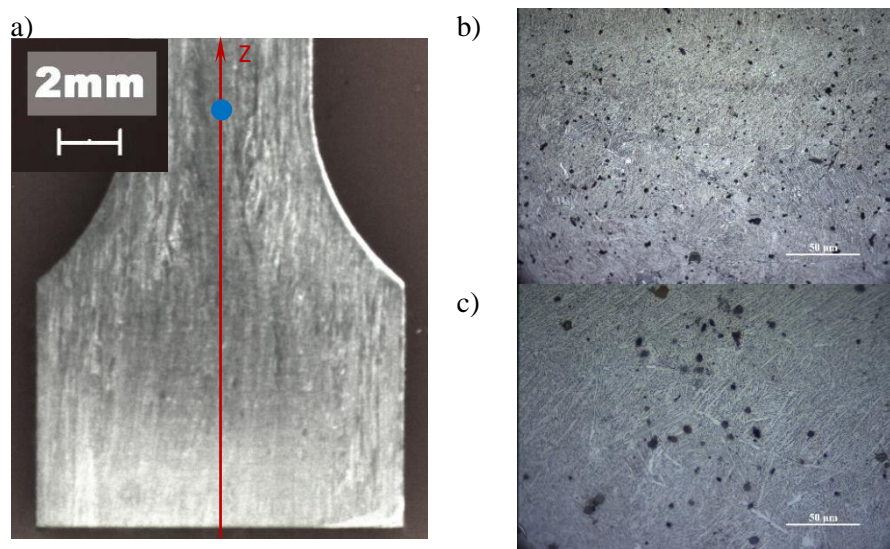
b)



c)

Rys. 3.22. Makro- i mikrostruktura próbki wykonanej z pręta z materiału Ti6Al4V pobrana wzdłuż osi Z w punkcie przed badaniami (Próbka PC-1): a) makrostruktura fragmentu próbki, b) mikrostruktura w powiększeniu x200, c) mikrostruktura w powiększeniu x500

Makrostruktura próbki DMLS nie poddanej obciążeniu (Próbka DMLS-1) wykazuje zmiany strukturalne w przekroju poprzecznym i podłużnym spowodowane procesem druku i związanym z doбором ścieżki skanowania lasera. Analizując zdjęcia mikroskopowe próbek niepoddanych statycznej próbie rozciągania można zauważyć różnicę w strukturze materiału Ti6Al4V w próbkach wytworzonych technologią DMLS oraz z pręta ciągnionego.



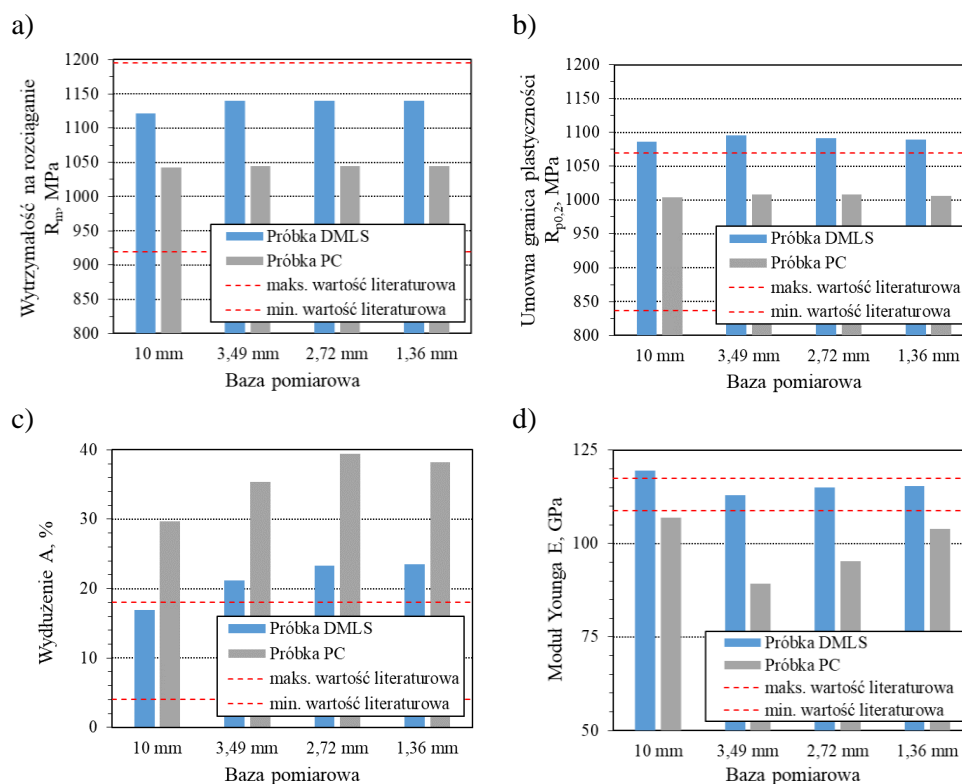
Rys. 3.23. Makro- i mikrostruktura materiału Ti6Al4V powstałego metodą addytywną DMLS pobrana z próbki wzdłuż osi Z w punkcie przed badaniami (Próbka DMLS-1): a) makrostruktura fragmentu próbki, mikrostruktura w powiększeniu x200, c) mikrostruktura w powiększeniu x500

Próbka PC- 1 wykazuje charakterystyczną dla Ti6Al4V strukturę dwufazową $\alpha+\beta$. Na zdjęciach mikroskopowych dokładnie widoczne są płytki martenzytu α otoczone dookoła ziarnami β . W próbce DMLS-1 scharakteryzowano strukturę martenzytyczną z widocznymi listwami martenzytu. Taki typ struktury charakterystyczny jest Ti6Al4V wytworzonego w procesach addytywnych ze względu na wysokie temperatury procesu, a także duże prędkości chłodzenia. Analiza zdjęć wykazała, że próbki drukowane DMLS charakteryzowały się wadami budowy tj. występowanie porowatości i pustych przestrzeni wynikających z procesu wytwarzania elementu technologią addytywną. Pęknięcia zmęczeniowe powstawały w większości od wad powierzchniowych wynikających z wysokiej chropowatości powierzchni próbek wykonanych technologią DMLS.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

4.1. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI STOPU Ti6Al4V UZYSKANYCH W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ ROZCIĄGAJĄCYCH

Przeprowadzone badania próbek wykonanych z pręta ciągnionego (Próbka PC) i próbek wykonanych metodą addytywną DMLS (Próbka DMLS) w warunkach obciążeń statycznych pozwoliły na wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych. Na rysunku 4.1 przedstawiono wyniki badań próbek DMLS oraz PC w odniesieniu do bazy pomiarowej (L1 ÷ L4), które porównano do danych literaturowych. Wartości bazy pomiarowej wynosiły odpowiednio dla cyfrowej korelacji obrazu: L1 = 1,36 mm, L2 = 2,72 mm, L3 = 3,49 mm, dla ekstensometru: L4 = 10 mm.



Rys. 4.1. Zestawienie zmian wartości parametrów mechanicznych w zależności od przyjętej bazy pomiarowego: a) wytrzymałości na rozciąganie R_m , b) umownej granicy plastyczności $R_{p0.2}$, c) modułu Younga E, d) wydłużenia A

Z przedstawionych danych wynika, że wartości R_m w funkcji zmiennego zakresu pomiarowego przyjmują wyższe wartości dla próbek DMLS w odniesieniu do próbek PC. Wyznaczono względną różnicę δR_m oraz $\delta R_{p0.2}$ w oparciu o zależność:

$$\delta R_O = \frac{R_{DMLS} - R_{PC}}{R_{PC}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Wytrzymałość na rozciąganie oraz granica plastyczności próbki DMLS w porównaniu do próbki PC są odpowiednio wyższe dla bazy pomiarowej:

- L1 = 1,36 mm: $\delta R_m = 7,6 \%$; $\delta R_{p0.2} = 8,4 \%$,
- L2 = 2,72 mm: $\delta R_m = 7,6 \%$; $\delta R_{p0.2} = 8,4 \%$,
- L3 = 3,49 mm: $\delta R_m = 8,0 \%$; $\delta R_{p0.2} = 8,4 \%$,
- L4 = 10 mm: $\delta R_m = 7,5 \%$; $\delta R_{p0.2} = 7,0 \%$.

Dla próbki DMLS stosunek $R_m/R_{p0.2}$ wyniósł odpowiednio dla bazy pomiarowej:

- L1 = 1,36 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,05$,
- L2 = 2,72 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,04$,
- L3 = 3,49 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,04$,
- L4 = 10 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,03$.

Dla próbki PC iloraz $R_m/R_{p0.2}$ wyniósł odpowiednio dla bazy pomiarowej:

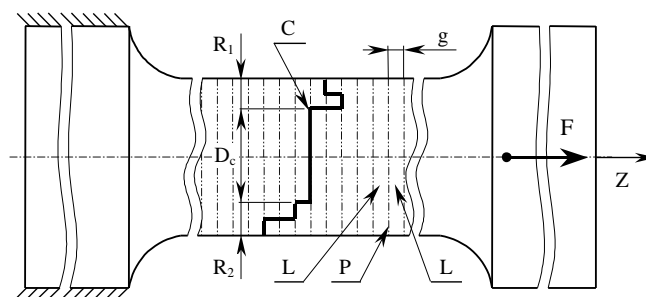
- L1 = 1,36 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,04$,
- L2 = 2,72 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,03$,
- L3 = 3,49 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,03$,
- L4 = 10 mm: $R_m/R_{p0.2} \approx 1,04$.

Wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności próbek DMLS wynikają ze sposobu ich wytworzenia, a co jest z tym związane, z różnicy mikrostruktur. W przypadku próbek DMLS otrzymano martenzytyczną strukturę α' , która jest bardziej wytrzymała, ale jednocześnie bardziej krucha od dwufazowej struktury $\alpha+\beta$ występującej w próbkach PC.

Dla obu rodzajów próbek DMLS oraz PC najwyższe wartości modułu Younga E uzyskano dla bazy pomiarowej $L_4 = 10$ mm (ekstensometr), natomiast najniższe dla bazy pomiarowej $L_3 = 3,49$ mm (DIC). Różnica w wartościach E dla próbki DMLS wyniosła $\Delta E = 6660$ MPa, a dla próbki PC była równa $\Delta E = 17706$ MPa. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że różnica wartości parametru E zależy od bazy pomiarowej: dla próbek wykonanych z pręta ciągnionego wynosi około 14 %, dla próbek wykonanych metodą addytywną około 2%.

Próbka DMLS wykonywana była pod kątem 90° co wskazuje, że badaniom podlegały połączenia kolejnych warstw elementu. Przyjęcie małej bazy pomiarowej powoduje ograniczenie ilości badanych warstw materiału, a tym samym ilości wad materiałowych występujących w analizowanej objętości. Wady materiałowe mogą wynikać z: braku przetopu proszku, występujących mikroporowatości, wtrąceń metalicznych itp. Zmiany wartości modułu Younga dla poszczególnych baz pomiarowych w próbce DMLS mogą być związane z lokalnymi zmianami właściwości materiału. Poszczególne bazy pomiarowe obejmują niewielkie fragmenty próbki w obszarze największego odkształcenia i późniejszego pęknięcia. W rezultacie na tym obszarze zachodzą największe lokalne zmiany właściwości materiałów. Analizując uzyskane wartości modułu Younga można zauważyć, że są one wyższe dla próbki DMLS niż te uzyskane dla próbki PC.

Analiza wydłużenia A wykazała, że wyższe wartości uzyskano dla próbek PC, które mieszczą się w zakresie $A = 28,3 \div 39,4$ %, natomiast dla próbek DMLS $A = 16,9 \div 23,5$ %. Wydłużenie A próbek DMLS jest niższe o około 48% od wyników dla próbek PC. Wyniki zmian wydłużenia A dla przyjętych baz pomiarowych wykazują, że najniższe wartości uzyskano dla obydwóch typów próbek dla $L_4 = 10$ mm. Im mniejsza baza pomiarowa, tym większa wartość odkształcenia. Najmniejsza baza pomiarowa obejmowała fragment próbki, w którym wystąpiło pęknięcie powstałe w wyniku działania sił rozciągających. Wystąpiła koncentracja naprężeń w miejscu pęknięcia i jednoczesny wzrost odkształcenia warstw materiału.



Rys. 4.2. Schematyczne przedstawienie sposobu pęknięcia próbek wykonanych metodą addytywną DMLS: F – siła rozciągająca, g – grubość warstwy materiału wytworzonej metodą addytywną, L – elementarna warstwa materiału, P – umowna powierzchnia styku sąsiadujących warstw, C – hipotetyczny przebieg pęknięcia próbki podanej osiowemu rozciąganiu, D_c – pęknięcie próbki realizowane wzdłuż powierzchni styku sąsiadujących warstw, R_1, R_2 – losowe inicjowanie pęknięcia i jego rozwój wzdłuż powierzchni styku warstw

Postać uszkodzenia próbek PC jest charakterystyczna dla materiałów sprężysto-plastycznych wykazujących przewężenie, natomiast próbki DMLS po zakończonej próbie rozciągania nie posiadają widocznego przewężenia. Sposób ich pęknięcia przebiega równoległe do powierzchni warstw próbki i wraz ze zmniejszającym się polem przekroju próbki pęknięcie rozwija się wzdłuż jednej z warstw. Schemat przebiegu uszkodzenia próbki DMLS przedstawiono na rysunku 4.2.

Porównując wyniki badań z danymi literaturowymi można stwierdzić, że wartość wytrzymałości materiału na rozciąganie są porównywalne z tymi uzyskanymi przez innych badaczy. Dla próbek wytworzonych pod kątem 90° bezpośrednio po procesie druku DMLS dane literaturowe wskazują, że wytrzymałość materiału na rozciąganie R_m mieści się w przedziale $919 \div 1195$ MPa. Natomiast umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ uzyskana dla próbki DMLS jest wyższa niż wskazują na to dane literaturowe. Porównując uzyskane wyniki wydłużenia A dla próbki DMLS z danymi literaturowymi można zauważyć, że dla największego zakresu L4 otrzymany wynik mieści się w przedziale $A = 4 \div 18\%$. Natomiast wartości odkształcenia dla mniejszych zakresów L1 \div L3 są wyższe niż maksymalna wartość podawana w literaturze. Tak jak wspomniano wcześniej mniejszy zakres pomiarowy skutkowało wyższymi wartościami odkształcenia.

Moduł Younga E uzyskany dla zakresu L4 był wyższy niż ten przedstawiany w literaturze o około $1,7 \div 9,0$ %. Natomiast moduł Younga uzyskany dla baz pomiarowych L1 \div L3 mieści się w przedziale literaturowym. Analizując wyniki badań można stwierdzić, że metoda DIC wykazywała różnice w porównaniu ze standardową metodą z wykorzystaniem ekstensometru stosowanego w badaniach inżynierskich. W przypadku zarówno próbek PC, jak i DMLS, wartość modułu Younga E malała wraz ze wzrostem analizowanej objętości. Przyczyną takich zmian mogło być słabe oświetlenie próbki podczas testów (zbyt ciemne lub prześwietlone zdjęcia), co przekłada się na „gubienie” punktów przez program w trakcie analizy. Różnice między modułem Younga otrzymane dla baz pomiarowych L1, L2 i L3 dla próbki DMLS są mniejsze niż dla próbki PC. Powierzchnia próbki DMLS była bardziej chropowata i matowa, co sprzyjało robieniu zdjęć o wyższej jakości, podczas gdy toczone próbki PC miały błyszczącą powierzchnię, która odbijała światło, powodując prześwietlenie zdjęć. Porównując wyniki uzyskane metodą DIC z wynikami uzyskanymi za pomocą ekstensometru stwierdzono, że różnią się one w zakresie około 5%.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że próbki ze stopu Ti6Al4V wytworzone metodą addytywną (próbki DMLS) i wykonane w procesie toczenia pręta ciągnionego (próbki PC) charakteryzują się różnymi wartościami wybranych parametrów mechanicznych. Technologia wytwarzania wpłynęła w znaczący sposób na mikrostrukturę badanego materiału, co przełożyło się na otrzymane wyniki badań. Do badań wytrzymałościowych wykorzystano próbki DMLS wytworzone pod kątem 90° (zgodnie z osią Z), co w literaturze jest przedstawiane jako najsłabszy kierunek druku. Porównanie wyników badań z danymi literaturowymi wykazało różnice w otrzymanych wartościach. Może być to spowodowane czynnikami technologicznymi tj. wielkością ziarna zastosowanego proszku metalu, mocą lasera, energią wiązki laserowej, prędkością chłodzenia itp., które mogą wpłynąć na otrzymane wyniki badań.

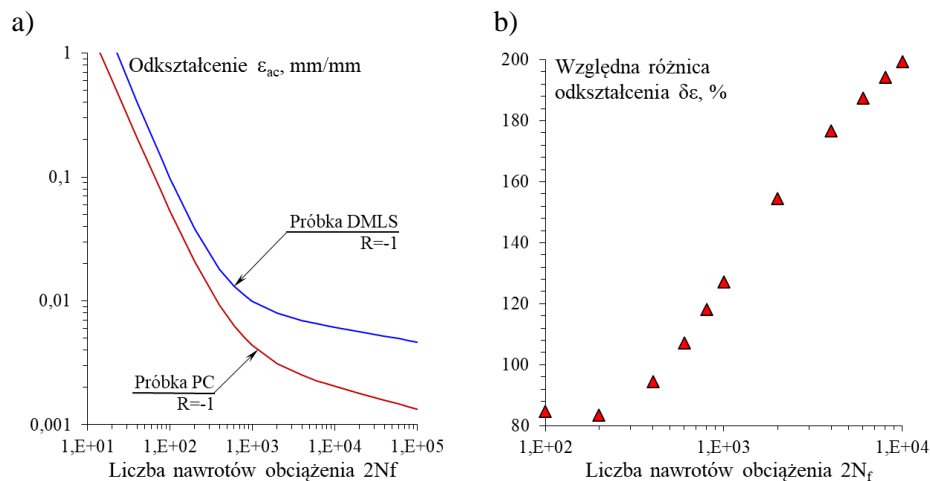
4.2. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ZMĘCZENIOWYCH STOPU Ti6Al4V

Przeprowadzone badania w warunkach obciążeń stałoamplitudowych $R=-1$ oraz programowanych pozwoliły na wyznaczenie wykresów trwałości zmęczeniowej oraz

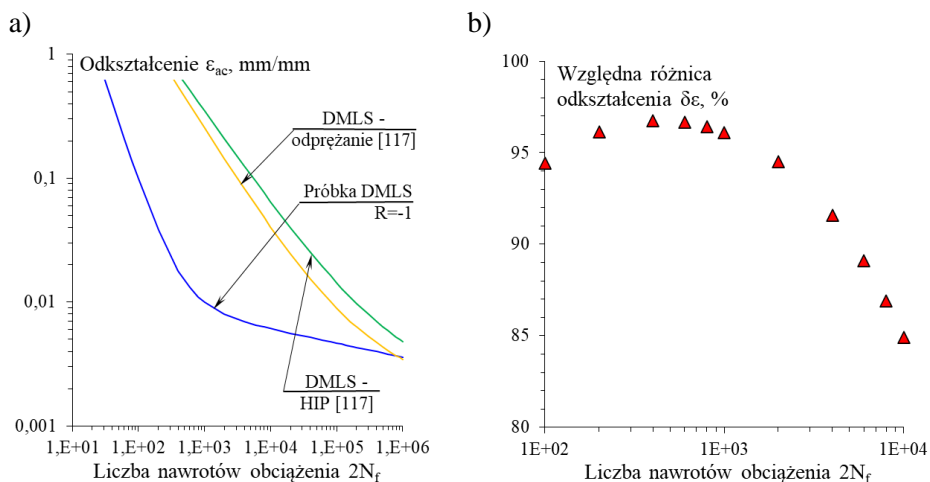
wykresów cyklicznego odkształcenia. Na rysunku 4.3a przedstawiono zestawienie wykresów trwałości zmęczeniowej dla próbek DMLS oraz próbek PC wyznaczonych w warunkach obciążeń o współczynniku $R=-1$. Natomiast na rysunku 4.3b zamieszczono względną różnicę odkształcenia, którą wyznaczono na podstawie zależności:

$$\delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_{DMLS} - \varepsilon_{PC}}{\varepsilon_{PC}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Analizując wykresy trwałości zmęczeniowej przedstawione na rysunku 4.3 można zauważyć, że wykres dla próbki DMLS charakteryzuje się wyższą trwałością zmęczeniową w odniesieniu do wykresu dla próbki PC. Porównując względną różnicę odkształcenia między badanymi wykresami można zauważyć, że zmienia się ona w zakresie $\delta\varepsilon = 83,5 \div 199,5 \%$. Względna różnica odkształcenia dla zakresu niskocyklowego zmęczenia dla $2N_f = 10^2$ wynosi $\delta\varepsilon = 84,7 \%$, dla $2N_f = 10^3$ wynosi $\delta\varepsilon = 127,2 \%$, a dla $2N_f = 10^4$ wynosi $\delta\varepsilon = 199,5 \%$.



Rys. 4.3. Wyniki badań dla próbki DMLS oraz PC: a) wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym, b) zmiana względnej różnicy odkształcenia



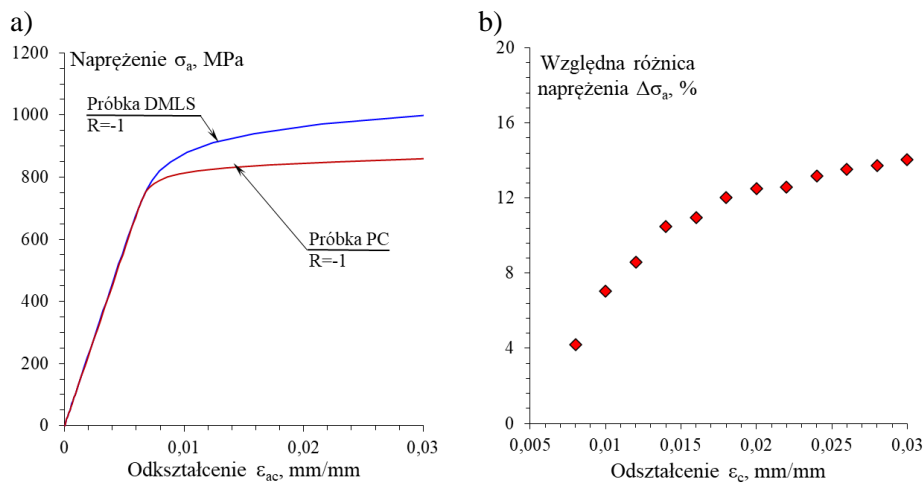
Rys. 4.4. Wyniki badań dla próbki DMLS oraz danych literaturowych: a) wykres trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym, b) zmiana względnej różnicy odkształcenia

Na rysunku 4.4 przedstawiono porównanie wyników badań z danymi literaturowymi. Rysunek 4.4b przedstawia względną różnicę odkształcenia, którą wyznaczono na podstawie równania:

$$\delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_{LITERATURA} - \varepsilon_{DMLS}}{\varepsilon_{LITERATURA}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbki DMLS porównano z literaturowymi wynikami eksperymentalnymi przeprowadzonymi w zbliżonych warunkach. Na podstawie porównania wyników badań można zauważyć, że próbka DMLS charakteryzuje się niższą trwałością zmęczeniową. Analizując względną różnicę między wynikami badań zauważa się, że zmienia się ona w zakresie $\delta\varepsilon = 85 \div 97\%$. Względna różnica odkształcenia dla zakresu niskocyklowego zmęczenia dla $2N_f = 10^2$ wynosi $\delta\varepsilon = 94\%$, dla $2N_f = 10^3$ wynosi $\delta\varepsilon = 96\%$, a dla $2N_f = 10^4$ wynosi $\delta\varepsilon = 85\%$. Różnice między wynikami badań, a danymi literaturowymi mogą wynikać z różnych parametrów procesu druku, a także zastosowanej obróbki cieplnej. Próbka DMLS była poddana wyżarzaniu w temp. 840°C przez 1 godzinę. Natomiast dane literaturowe wskazywały na wykorzystanie próbek poddanych wyżarzaniu odprężającemu w temp. 670°C przez 5 godzin. Inne parametry procesu druku oraz różnice w obróbce cieplej powodują występowanie różnych mikrostruktur, co może wpłynąć na otrzymane wyniki badań zmęczeniowych.

Przeprowadzona została także analiza wykresów cyklicznego odkształcenia, które pokazano na rysunku 4.5a. Porównano wykresy dla próbek PC oraz DMLS otrzymane na podstawie badań w warunkach stałoamplitudowych o współczynniku asymetrii $R=-1$.



Rys. 4.5. Wyniki badań dla próbki DMLS oraz PC badań w warunkach stałoamplitudowych o współczynniku asymetrii $R=-1$: a) wykres cyklicznego odkształcenia, b) zmiana względnej różnicy naprężenia

Na rysunku 4.5b przedstawiono względną różnicę wartości naprężeń między próbką PC, a próbką DMLS obliczoną na podstawie następującej zależności:

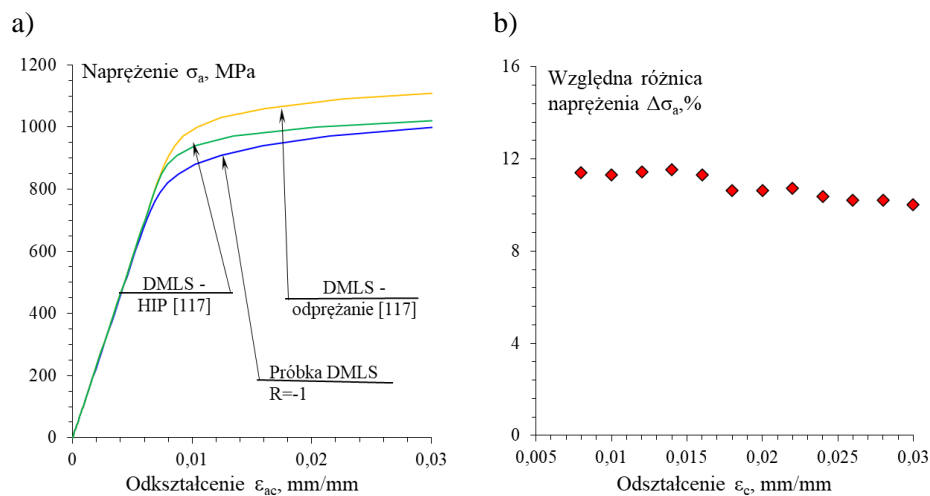
$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{DMLS} - \sigma_{PC}}{\sigma_{PC}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Z przeprowadzonych badań wynika, że stop Ti6Al4V dla obu rodzajów próbek ulega cyklicznemu osłabieniu. Porównując wykresy cyklicznego odkształcenia można stwierdzić, że dla tej samej wartości odkształcenia próbka DMLS przyjmuje wyższe wartości naprężenia w odniesieniu do próbki PC. Dla odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0,01$ mm/mm różnica naprężenia jest równa ~ 70 MPa, $\epsilon_{ac} = 0,02$ mm/mm ~ 130 MPa, $\epsilon_{ac} = 0,03$ mm/mm ~ 150 MPa. Względna różnica naprężeń między próbką DMLS, a PC wynosi $\Delta\sigma_a = 4,4 \div 16,4$ %.

Na rysunku 6.6 przedstawiono porównanie wykresów cyklicznego odkształcenia dla próbek DMLS z danymi literaturowymi. Rysunek 6.6b przedstawia zmianę względnej różnicy naprężenia między badaniami a danymi literaturowymi, którą wyznaczono przy pomocy zależności:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{LITERATURA} - \sigma_{DMLS}}{\sigma_{LITERATURA}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Z porównania wykresów cyklicznego odkształcenia wynika, że próbka DMLS dla określonych wartości odkształcenia osiąga niższe naprężenia w porównaniu do danych literaturowych. Porównanie wykresów DMLS z wynikami literaturowymi dla odprężania pokazuje, że wraz ze wzrostem odkształcenia maleje względna różnica naprężenia. Dla odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0,01$ mm/mm różnica naprężenia jest równa ~ 60 MPa, $\epsilon_{ac} = 0,02$ mm/mm ~ 30 MPa, $\epsilon_{ac} = 0,03$ mm/mm ~ 15 MPa. Względna różnica naprężenia wynosi $\Delta\sigma_a = 10,0 \div 11,5$ % i maleje wraz ze wzrostem odkształcenia.



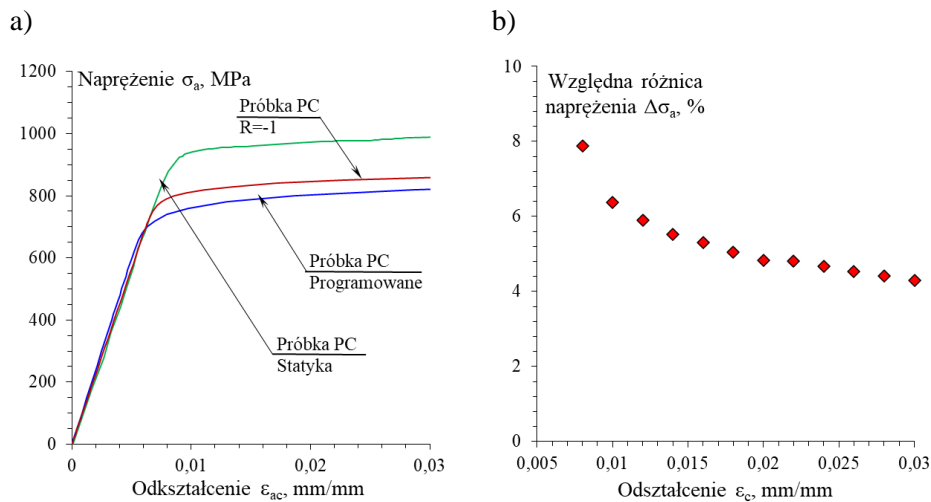
Rys. 4.6. Wyniki badań dla próbki DMLS oraz danych literaturowych: a) wykres cyklicznego odkształcenia, b) zmiana względnej różnicy naprężenia

Na rysunku 4.7a zestawiono wykresy próbki PC otrzymane na podstawie badań w warunkach obciążeń stałopłitudowych $R=-1$ oraz programowanych. Na rysunku 4.7b przedstawiono różnicę wartości naprężeń między próbkami PC obliczoną z wykorzystaniem zależności:

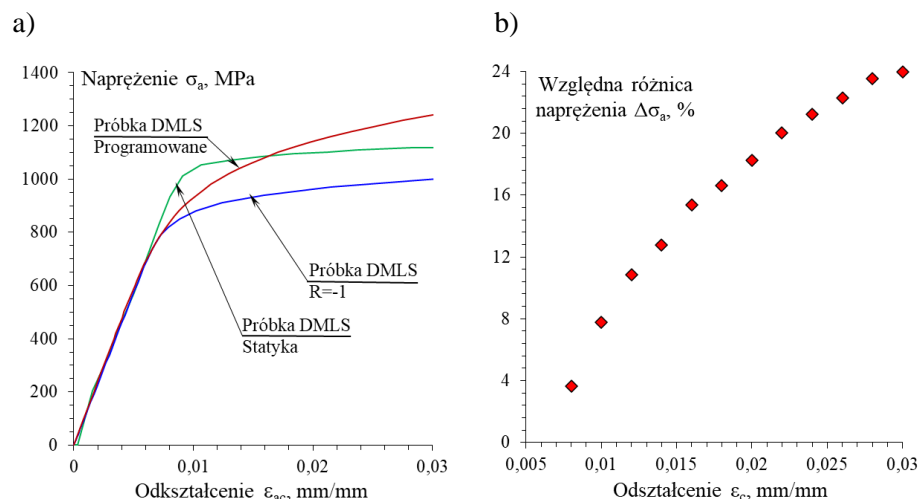
$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{PROGRAMOWANE} - \sigma_{R=-1}}{\sigma_{PROGRAMOWANE}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Wykresy cyklicznego odkształcenia wskazują, że próbka PC badana w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych charakteryzuje się wyższymi naprężeniami dla tych samych wartości odkształcenia w porównaniu do badań programowanych. Porównanie wyników badań próbki PC dla obciążeń stałoaamplitudowych i próbki PC dla obciążeń programowanych wskazuje, że wzrostowi towarzyszy spadek różnicy naprężenia. Dla odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0,01$ mm/mm różnica naprężenia jest równa ~ 50 MPa, dla $\epsilon_{ac}=0,02$ mm/mm wynosi ~ 40 MPa, natomiast dla $\epsilon_{ac} = 0,03$ mm/mm osiąga wartość ~ 35 MPa. Względna różnica naprężenia wynosi $\Delta\sigma_a = 4,3 \div 7,9$ % i maleje wraz ze wzrostem odkształcenia.

Rysunek 4.8 prezentuje zestawienie wykresów cyklicznego odkształcenia próbek DMLS uzyskanych na podstawie przeprowadzonych badań w warunkach obciążeń stałoaamplitudowych $R=-1$ oraz obciążeń programowanych. Na rysunku 4.8b przedstawiono różnicę wartości naprężeń między próbkami DMLS obliczoną na podstawie równania (4.6).



Rys. 6.7. Wyniki badań dla próbki PC badań w warunkach stałoaamplitudowych o współczynniku asymetrii $R=-1$ oraz badań programowanych: a) wykres cyklicznego odkształcenia, b) zmiana względnej różnicy naprężenia

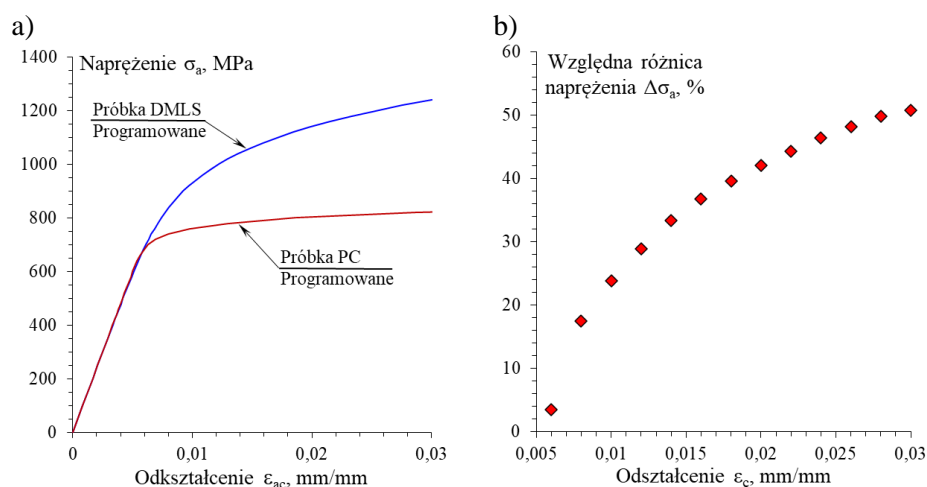


Rys. 6.8. Wyniki badań dla próbki DMLS badań w warunkach stałoaamplitudowych o współczynniku asymetrii $R=-1$ oraz badań programowanych: a) wykres cyklicznego odkształcenia, b) zmiana względnej różnicy naprężenia

Z przeprowadzonej analizy wynika, że do około 800 MPa obie próbki charakteryzują się zbliżoną wartością odkształcenia. Dla odkształcenia $\epsilon_{ac} = 0,01$ mm/mm różnica naprężenia

jest równa ~ 60 MPa, dla $\varepsilon_{ac} = 0,02$ mm/mm ~ 190 MPa, dla $\varepsilon_{ac} = 0,03$ mm/mm ~ 240 MPa. Względna różnica naprężenia wynosi $\Delta\sigma_a = 3,6 \div 24,0$ %. Względna różnica naprężenia wzrasta wraz ze zwiększaniem się wartości odkształcenia.

Rysunek 4.9 przedstawia wyniki badań w warunkach obciążeń programowanych. Na rysunku 4.9b przedstawiono różnicę wartości naprężeń między próbkami DMLS oraz PC obliczoną na podstawie zależności (4.4). W przypadku badań programowanych zauważa się znaczące różnice w wynikach między próbkami DMLS, a próbkami PC. Dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,01$ mm/mm różnica naprężenia wynosi 160 MPa, dla $\varepsilon_{ac} = 0,02$ mm/mm jest równa 320 MPa, natomiast dla $\varepsilon_{ac} = 0,02$ mm/mm sięga 410 MPa. Względna różnica naprężenia wzrasta wraz ze wzrostem odkształcenia. Dla odkształcenia na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,01$ mm/mm jest równa $\Delta\sigma_a = 23,8$ %, dla $\varepsilon_{ac} = 0,02$ mm/mm wynosi $\Delta\sigma_a = 42,0$ %, $\varepsilon_{ac} = 0,03$ mm/mm sięga $\Delta\sigma_a = 56,7$ %.



Rys. 4.9. Wyniki badań dla próbki DMLS oraz PC w warunkach programowanych: a) wykres cyklicznego odkształcenia, b) zmiana względnej różnicy naprężenia

5. WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Analiza wyników badań doświadczalnych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej pozwoliła na sformułowanie szeregu uwag i wniosków:

- a) badania doświadczalna w warunkach obciążeń zmiennych:
 - badania w warunkach obciążeń stałoamplitudowych $R=-1$ wykazały wyższą trwałość zmęczeniową (wykres Mansona-Coffina) w zakresie niskocyklowego zmęczenia próbek DMLS w porównaniu do wyników dla próbek PC – wzajemne położenie wykresów trwałości zmęczeniowej może wynikać z warunków przeprowadzenia badań (badania próbek DMLS prowadzono dla sterowania odkształceniem $\varepsilon_{ac} = \text{const.}$, badanie próbek PC realizowano dla sterowania naprężeniem $\sigma_a = \text{const.}$), lecz wpływ warunków sterowania uwidacznia się w istotny sposób dla liczby cykli powyżej 10^6 cykli,
 - różnice względne $\delta\varepsilon$ obliczone dla wykresów Mansona-Coffina dla odkształceń $\varepsilon_{ac} = f(2N_f)$ mieszczą się w zakresie od 85% (dla $2N_f = 10^2$) do 200% (dla $2N_f = 10^4$),
 - porównanie wykresów cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda dla obciążeń $R = -1$ i dla obciążeń programowanych (Lo-Hi-Lo) z wykresem statycznego rozciągania dla próbek DMLS wskazuje na cykliczne osłabianie

materiału do około $\varepsilon = 0,02$; powyżej $\varepsilon = 0,02$ wg wykresu Ramberga-Osgooda dla obciążeń Lo-Hi-Lo materiał podlega cyklicznemu umocnieniu; świadczą o tym dane odczytane z wykresów:

dla odkształceń $\varepsilon = 0,01$ wartość naprężeń odczytana z wykresu:

- statycznego rozciągania wynosi $S = \sim 1041$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda ($R=-1$)
 $S = \sim 873$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda (Lo-Hi-Lo)
 $S = \sim 940$ MPa,

dla odkształceń $\varepsilon = 0,02$ wartość naprężeń odczytana z wykresu:

- statycznego rozciągania wynosi $S = \sim 1100$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda ($R=-1$)
 $S = \sim 966$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda (Lo-Hi-Lo)
 $S = \sim 1143$ MPa,

dla odkształceń $\varepsilon = 0,03$ wartość naprężeń odczytana z wykresu:

- statycznego rozciągania wynosi $S = \sim 1118$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda ($R=-1$)
 $S = \sim 999$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda (Lo-Hi-Lo)
 $S = \sim 1239$ MPa,

- o porównanie wykresów cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda dla obciążeń $R=-1$ i dla obciążeń programowanych (Lo-Hi-Lo) z wykresem statycznego rozciągania dla próbek PC wskazuje na cykliczne osłabianie materiału;

dla odkształceń $\varepsilon = 0,01$ wartość naprężeń odczytana z wykresu:

- statycznego rozciągania wynosi $S = \sim 943$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda ($R=-1$)
 $S = \sim 811$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda (Lo-Hi-Lo)
 $S = \sim 759$ MPa,

dla odkształceń $\varepsilon = 0,02$ wartość naprężeń odczytana z wykresu:

- statycznego rozciągania wynosi $S = \sim 972$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda ($R=-1$)
 $S = \sim 845$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda (Lo-Hi-Lo)
 $S = \sim 805$ MPa,

dla odkształceń $\varepsilon = 0,03$ wartość naprężeń odczytana z wykresu:

- statycznego rozciągania wynosi $S = \sim 990$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda ($R=-1$)
 $S = \sim 859$ MPa,
- cyklicznego odkształcenia Ramberga-Osgooda (Lo-Hi-Lo)
 $S = \sim 822$ MPa,

- o w każdym z badanych przypadków wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek DMLS w warunkach obciążeń programowanych Lo-Hi-Lo przy sterowaniu odkształceniem ($\varepsilon_{ac\ min} = 0,6\%$ - $\varepsilon_{ac\ max} = 1,1\%$ - $\varepsilon_{ac\ min} = 0,6\%$) wykazały realizację

- pełnych dwóch bloków obciążenia (liczba cykli w bloku wynosiła $n_o = 420$ cykli), a pęknięcie zmęczeniowe próbki następowało przy narastającej wartości odkształcenia w trzecim bloku w zakresie od $\varepsilon_{ac i} = 0,7\%$ do $\varepsilon_{ac i} = 1,0\%$,
- wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek PC w warunkach obciążeń programowanych Lo-Hi-Lo (poziomy obciążen i warunki badań zgodne z warunkami dla próbek DMLS) wykazały realizację pełnych pięciu bloków obciążenia, a pęknięcie zmęczeniowe próbki następowało po realizacji minimum 5 bloków obciążenia,
 - przyczyną różnic trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń programowanych mogła być chropowatość powierzchni części pomiarowej próbek badawczych; w przypadku próbek PC średnia arytmetyczna parametru wynosiła $R_a = 0,27 \mu\text{m}$, natomiast dla próbek DMLS średnia arytmetyczna parametru wynosiła $R_a = 1,90 \mu\text{m}$; blisko 7-mio krotna różnica średniej arytmetycznej parametru R_a przełożyła się na spadek trwałości próbek DMLS w stosunku do trwałości próbek PC o około 60 %; zastosowanie w badaniach próbek DMLS o chropowatości powierzchni w stanie po druku wynikało z założenia, że elementy konstrukcyjne o złożonej geometrii wykonywane metodą addytywną w większości przypadków nie są poddawane obróbce mechanicznej,
 - analiza pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek DMLS na poszczególnych stopniach bloku obciążenia pozwoliła na obliczenie względnych różnic odkształcenia plastycznego pomiędzy pierwszym a ostatnim pełnym blokiem dla:
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) i malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) dla:
 - dla I bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 142 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 6 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - dla II bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 16 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 3 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) w I i II bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 136 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 6 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
 - malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) w I i II bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 13 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 6 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
 - wyniki wskazują, że na proces stabilizacji właściwości materiału miało wpływ odkształcenie plastyczne zrealizowane w ramach I bloku obciążenia dla narastającej wartości amplitudy odkształceń ε_{ac} (Lo-Hi),
 - analiza pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek PC na poszczególnych stopniach bloku obciążenia programowanego pozwoliła na obliczenie względnych różnic odkształcenia plastycznego pomiędzy pierwszym a ostatnim pełnym blokiem dla:
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) i malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) dla:
 - dla I bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 7953 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 10 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - dla V bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 9 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 2 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,

- narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) w I i V bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 11228 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 16 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
- malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) w I i V bloku obciążenia: od $\delta_{Eapl} = 35 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{Eapl} = 17 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
- wyniki wskazują, że na proces stabilizacji właściwości materiału miało wpływ odkształcenie plastyczne zrealizowane w ramach I bloku obciążenia dla narastającej wartości amplitudy odkształceń ε_{ac} (Lo-Hi),
- analiza pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek DMLS na poszczególnych stopniach bloku obciążenia pozwoliła na obliczenie względnych różnic amplitudy naprężenia σ_a pomiędzy pierwszym a ostatnim pełnym blokiem dla:
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) i malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) dla:
 - dla I bloku obciążenia: $\delta_{\sigma} = 4 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$, $\delta_{\sigma} = 5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,75\%$, $\delta_{\sigma} = 2 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - dla II bloku obciążenia: $\delta_{\sigma} = 2 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$, $\delta_{\sigma} = 2,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,75\%$, $\delta_{\sigma} = 1 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) w I i II bloku obciążenia: $\delta_{\sigma} = 4 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$, $\delta_{\sigma} = 5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,75\%$, $\delta_{\sigma} = 2,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
 - malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) w I i II bloku obciążenia: od $\delta_{\sigma} = 2 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{\sigma} = 2,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
- analiza pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek PC na poszczególnych stopniach bloku obciążenia pozwoliła na obliczenie względnych różnic amplitudy naprężenia σ_a pomiędzy pierwszym a ostatnim pełnym blokiem dla:
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) i malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) dla:
 - dla I bloku obciążenia: $\delta_{\sigma} = 6 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$, $\delta_{\sigma} = 13 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,85\%$, $\delta_{\sigma} = 4 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - dla V bloku obciążenia: $\delta_{\sigma} = 0,1 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$, $\delta_{\sigma} = 1,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,9\%$, $\delta_{\sigma} = 0,8 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) w I i V bloku obciążenia: $\delta_{\sigma} = 7 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$, $\delta_{\sigma} = 15 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,85\%$, $\delta_{\sigma} = 6,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
 - malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) w I i V bloku obciążenia: od $\delta_{\sigma} = 1 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_{\sigma} = 6,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,
- analiza pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek DMLS na poszczególnych stopniach bloku obciążenia pozwoliła na obliczenie względnych różnic parametru energii pętli histerezy W pomiędzy pierwszym a ostatnim pełnym blokiem dla:
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) i malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) dla:
 - dla I bloku obciążenia: od $\delta_W = 141 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_W = 5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - dla II bloku obciążenia: od $\delta_W = 13 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_W = 2 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) w I i II bloku obciążenia: od $\delta_W = 134 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_W = 2,5 \%$ dla $\varepsilon_{ac} = 1,1\%$,

- malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) w I i II bloku obciążenia: od $\delta_w = 9\%$ dla $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_w = 2,5\%$ dla $\epsilon_{ac} = 1,1\%$,
- analiza pętli histerezy zarejestrowanych dla próbek PC na poszczególnych stopniach bloku obciążenia pozwoliła na obliczenie względnych różnic parametru energii pętli histerezy W pomiędzy pierwszym a ostatnim pełnym blokiem dla:
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) i malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) dla:
 - dla I bloku obciążenia: od $\delta_w = 12624\%$ dla $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_w = 8,5\%$ dla $\epsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - dla V bloku obciążenia: od $\delta_w = 11\%$ dla $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_w = 1\%$ dla $\epsilon_{ac} = 1,05\%$,
 - narastającej wartości odkształcenia (Lo-Hi) w I i V bloku obciążenia: od $\delta_w = 17465\%$ dla $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_w = 8\%$ dla $\epsilon_{ac} = 1,1\%$,
 - malejącej wartości odkształcenia (Hi-Lo) w I i V bloku obciążenia: od $\delta_w = 53\%$ dla $\epsilon_{ac} = 0,6\%$ do $\delta_w = 8\%$ dla $\epsilon_{ac} = 1,1\%$,
- wykresy zmian odkształcenia plastycznego ϵ_{apl} , amplitudy naprężenia σ_a , a także parametru energii pętli histerezy W w funkcji zmiennej amplitudy odkształcenia ϵ_{ac} (parametru sterującego) pokazują, że największe zmiany w materiale zachodzą podczas realizacji stopniowo narastającej wartości odkształcenia w ramach I bloku obciążenia,
- próbki DMLS wykazywały odkształcenie plastyczne od najniższych wartości odkształceń $\epsilon_{ac} = 0,6\%$,
- na podstawie porównania wykresu statycznego rozciągania z wykresem cyklicznego odkształcenia dla próbki DMLS wyznaczonego dla obciążeń zmiennych określono cykliczną granicę plastyczności wynoszącą $R_e' = 775\text{ MPa}$, która jest istotnie niższa od wartości $R_{p0,2}$ wyznaczonej dla obciążeń statycznych; wartość R_e' jest wartością naprężeń granicznych, które mogą być stosowane w projektowaniu elementów konstrukcyjnych mających pracować w zakresie odkształceń sprężystych,
- b) badania doświadczalna w warunkach obciążeń statycznych:
 - przeprowadzone wg normy PN EN ISO 6892-1:2016 wykazały, że próbki DMLS wydrukowane zgodnie z osią Z charakteryzują się w porównaniu do wyników dla próbek PC:
 - wyższą umowną granicą plastyczności $R_{p0,2}$ o 11,0%,
 - wyższą wytrzymałością materiału na rozciąganie R_m o około 11,6%,
 - zbliżoną wartością modułu sprężystości podłużnej E pomimo różnicy występującej między strukturami,
 - niższą wartością wydłużenia A o 47,8%,
 - przeprowadzone metodą cyfrowej korelacji obrazu DIC wykazały, że dla różnych baz pomiarowych zmiana wartości modułu sprężystości podłużnej E mieściła się w zakresie od 112950 MPa do 119610 MPa, gdzie różnica wskazanych wartości stanowi 5,5%; wskazuje to na zbliżone lokalne właściwości materiału wytworzonego metodą addytywną DMLS,
 - stosunek wytrzymałości na rozciąganie R_m do umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ wynosi:
 - dla próbek DMLS w zakresie $1,03 \div 1,05$,

- dla próbek PC w zakresie $1,03 \div 1,04$,
co wskazuje na zbliżone właściwości materiału pomimo różnej mikrostruktury,
 - o wskazują na możliwość wykorzystania tej technologii w zakresie wykonywania elementów konstrukcyjnych pracujących w warunkach obciążeń statycznych,
 - o pękanie próbek DMLS następowało równoległe do płaszczyzn druku i wraz ze zmniejszającym się polem przekroju próbki pęknięcie rozwijało się wzdłuż jednej z warstw; może to wskazywać na uszkodzenie międzywarstwowe z powodu braku silnego wiązania między kolejno nakładanymi warstwami,
- c) badania twardości powierzchniowej HV5 przeprowadzone zgodnie z normą PN EN ISO 6507-1:2018-05:
- o nieobciążonych próbek DMLS i próbek PC wykazały różnice twardości w zależności od miejsca wykonywania pomiaru:
 - dla średnich arytmetycznych populacji:
 - wzdłuż osi Z – $H_{DMLS} = 393,2 \text{ HV5}$, $H_{PC} = 357,6 \text{ HV5}$, wzrost wartość materiału próbek DMLS o 10,0%,
 - na płaszczyźnie x-z – $H_{DMLS} = 394,8 \text{ HV5}$, $H_{PC} = 357,5 \text{ HV5}$, wzrost wartość materiału próbek DMLS o 10,4%,
 - na płaszczyźnie x-y – $H_{DMLS} = 384,8 \text{ HV5}$, $H_{PC} = 349,7 \text{ HV5}$, wzrost wartość materiału próbek DMLS o 10,0%,
co wskazuje na występującą zależność w badaniach,
 - dla wartości minimalnych i maksymalnych populacji:
 - wzdłuż osi Z:
 - próbka DMLS: $H_{max} = 413,0 \text{ HV5}$, $H_{min} = 375,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 37,5 \text{ HV5}$,
 - próbka PC: $H_{max} = 400,0 \text{ HV5}$, $H_{min} = 342,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 57,5 \text{ HV5}$,
 - na płaszczyźnie x-z:
 - próbka DMLS: $H_{max} = 407,5 \text{ HV5}$, $H_{min} = 375,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 32,0 \text{ HV5}$,
 - próbka PC: $H_{max} = 381,0 \text{ HV5}$, $H_{min} = 345,0 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 36,0 \text{ HV5}$,
 - na płaszczyźnie x-y:
 - próbka DMLS: $H_{max} = 402,0 \text{ HV5}$, $H_{min} = 361,0 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 41,0 \text{ HV5}$,
 - próbka PC: $H_{max} = 391,0 \text{ HV5}$, $H_{min} = 323,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 67,5 \text{ HV5}$,
 - o poddanych obciążeniu prowadzącemu do zerwania próbek DMLS i próbek PC wykazały różnice twardości w zależności od miejsca wykonywania pomiaru:
 - dla średnich arytmetycznych populacji:
 - wzdłuż osi Z – $H_{DMLS} = 423,0 \text{ HV5}$, $H_{PC} = 364,0 \text{ HV5}$, wzrost wartość materiału próbek DMLS o 16,0%,
 - na płaszczyźnie x-z – $H_{DMLS} = 427,4 \text{ HV5}$, $H_{PC} = 368,7 \text{ HV5}$, wzrost wartość materiału próbek DMLS o 15,9%,
 - na płaszczyźnie x-y – $H_{DMLS} = 414,8 \text{ HV5}$, $H_{PC} = 348,6 \text{ HV5}$, wzrost wartość materiału próbek DMLS o 19,0%,

- dla wartości minimalnych i maksymalnych populacji:
 - wzdłuż osi Z:
 - próbka DMLS: $H_{\max} = 450,5 \text{ HV5}$, $H_{\min} = 396,0 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 54,5 \text{ HV5}$,
 - próbka PC: $H_{\max} = 394,5 \text{ HV5}$, $H_{\min} = 341,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 53 \text{ HV5}$,
 - na płaszczyźnie x-z:
 - próbka DMLS: $H_{\max} = 453,5 \text{ HV5}$, $H_{\min} = 401,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 52,0 \text{ HV5}$,
 - próbka PC: $H_{\max} = 393,5 \text{ HV5}$, $H_{\min} = 351,0 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 42,5 \text{ HV5}$,
 - na płaszczyźnie x-y:
 - próbka DMLS: $H_{\max} = 438,0 \text{ HV5}$, $H_{\min} = 391,0 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 47,0 \text{ HV5}$,
 - próbka PC: $H_{\max} = 363,0 \text{ HV5}$, $H_{\min} = 327,5 \text{ HV5}$, różnica wartości $\Delta H = 35,5 \text{ HV5}$,
 - wykazały, że w wyniku poddania materiału obciążeniu rozciągającemu nastąpił wzrost twardości materiału (obliczając wg średniej arytmetycznej):
 - wzdłuż osi Z: próbki DMLS – 7,6 %, próbki PC – 1,8 %,
 - na płaszczyźnie x-z: próbki DMLS – 8,3 %, próbki PC – 3,1 %
 - na płaszczyźnie x-y: próbki DMLS – 7,8 %, próbki PC – -0,3 %,
 - wykazały, że poddanie obciążeniu próbek spowodowało widoczny wzrost twardości mierzony wzdłuż osi Z pomiędzy pierwszym a dziesiątym (mieszczącym się w obszarze wysokich odkształceń plastycznych) punktem pomiarowym wynoszący: dla próbek DMLS – 4,1 %, dla próbek PC – 6,4 %,
 - wykazały różnice w twardości materiału mierzonej w płaszczyźnie x-z i płaszczyźnie x-y wynoszące:
 - dla próbek DMLS:
 - nie obciążonych – 2,6 %,
 - po badaniach wytrzymałości statycznej – 3,0 %,
 - dla próbek PC:
 - nie obciążonych – 2,2 %,
 - po badaniach wytrzymałości statycznej – 5,8 %,
 - przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że materiał wytworzony metodą addytywną dla kierunku druku wzdłuż osi Z należy uznać za izotropowy, na co wskazują wyniki badań twardości
- d) badania makro- i mikrostruktury wykazały:
- różnice w mikrostrukturze między materiałem wykonanym w postaci pręta hutniczego, a wytworzonym w procesie addytywnym – pierwszy z nich charakteryzuje się dwufazową strukturą $\alpha+\beta$, natomiast drugi jednofazową strukturą α' , która posiada niską wartość odkształcenia, wykazuje uszkodzenia międzykrystaliczne,
 - obciążenia rozciągające wpływają na zmiany w strukturze obiektów wytworzonych metodą addytywną DMLS powodując wyraźne wyodrębnienie trzech obszarów (I – obszar istotnych zmian struktury materiału powstałych na skutek działania siły

rozciągającej, II – strefa przejściowa, III – obszar o ograniczonym oddziaływaniu siły rozciągającej), z których obszar I charakteryzuje się występowaniem dużych odkształceń plastycznych i uwidocznienia kierunkowości struktury zgodnej z ułożeniem linii sił,

- elementy wykonane technologią addytywną DMLS charakteryzowały się wadami budowy tj. występowaniem porowatości i pustych przestrzeni oraz wad powierzchniowych wynikających z procesu wytwarzania, które w istotny sposób mogą wpłynąć na właściwości zmęczeniowe elementu.