

**Cezary Kostrzewski**  
**Wojciech Moćko**  
Instytut Transportu Samochodowego

## **ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH BLACHY WYKONANEJ ZE STOPU TYTANU Ti6Al4V W WARUNKACH QUASI-STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH OBCIĄŻEŃ ROZCIĄGAJĄCYCH**

W artykule przedstawiono metodykę badania próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach quasi-statycznych oraz dynamicznych, przeprowadzonego odpowiednio z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej oraz metody zmodyfikowanego pręta Hopkinsona. Przebieg procesu rozciągania został przeanalizowany metodą cyfrowej korelacji obrazu, w wyniku czego otrzymano rozkład wartości odkształcenia na powierzchni badanych próbek. Na podstawie danych zarejestrowanych przez maszynę wytrzymałościową oraz uzyskanych z użyciem teorii propagacji fal sprężystych w prętach wyznaczono krzywe rozciągania dla poszczególnych prób. W oparciu o uzyskane charakterystyki materiałowe stworzono model, który umożliwił symulację procesu rozciągania z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku ABAQUS/Standard.

### ***MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS OF THE PLATE MADE OF Ti6Al4V IN THE QUASI-STATIC AND DYNAMIC TENSILE LOADING***

*This paper presents the testing methodology of specimens made of titanium alloy Ti6Al4V in the quasi-static and dynamic conditions. Tests was carried out using the testing machine and the split Hopkinson tensile bar method. The tensile process was analyzed by digital image correlation to give a strain distribution on the specimen surface. Based on data recorded from testing machine and data obtained using the theory of the elastic wave propagation in bars the tensile curves was created for each test. Furthermore the tensile test simulation was carried out using the gained material characteristics in the ABAQUS/Standard environment.*

## 1. Wstęp

Ti6Al4V jest jednym z najczęściej używanych stopów tytanu. Jest to stop dwufazowy, składający się z faz typu  $\alpha$  i  $\beta$ . Głównymi pierwiastkami stopowymi tego materiału są aluminium, które stabilizuje fazę  $\alpha$  oraz wanad stabilizujący fazę  $\beta$  [2,11].

Skład chemiczny stopu tytanu zaprezentowano w Tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny stopu tytanu Ti6Al4V według normy ISO 5832/3

Table 1

*Chemical composition of Ti6Al4V alloy according to ISO 5832/3*

Skład chemiczny [% masowy]							
Al	V	O	Fe	H	C	N	Ti
5.5	3.5	<0.2	<0.3	<0.0015	<0.08	<0.05	pozostałość

Stopy tytanu Ti-6Al-4V charakteryzują się interesującą z punktu widzenia potencjalnych zastosowań praktycznych kombinacją właściwości: niewielką gęstością równą 4,5 g/cm<sup>3</sup>, modułem Younga wynoszącym 115 GPa, nadzwyczaj wysoką wytrzymałością ( $R_m$  powyżej 1000 MPa) przy dość wysokiej ciągliwości ( $A=14\%$ ) oraz wysoką temperaturą topnienia ( $T_t=1680^\circ\text{C}$ ), co sprawia iż łatwo poddaje się operacjom obróbki plastycznej na zimno (np. ciągnięcie rurek). Jedną z największych zalet stopów tytanu jest ich odporność na korozję w temperaturze otoczenia w powietrzu i w wielu rodzajach atmosfery przemysłowej. Jednak w podwyższonej temperaturze stopy tytanu łatwo wchodzi w reakcje z innymi materiałami, stąd konieczne jest stosowanie niekonwencjonalnych metod topienia i odlewania, co znacząco podwyższa ich koszt produkcji i obróbki. Stop Ti6Al4V posiada znacznie większą wytrzymałość niż czysty tytan, przy jednakowej sztywności i właściwościach termicznych [12].

Stopy tytanu można poddawać różnym procesom obróbki, m. in. obróbce plastycznej, odlewaniu, zgrzewaniu, spawaniu, lutowaniu oraz skrawaniu. Wybierając metodę obróbki należy jednak zwracać szczególną uwagę na ich właściwości chemiczne (reaktywność chemiczna) i fizyczne (niski moduł elastyczności, duża wytrzymałość).

Stop tytanu Ti6Al4V znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu takich jak: motoryzacja, lotnictwo czy biomedycyna.

W branży lotniczej wykorzystywanie stopów tytanu jest powszechne ze względu na właściwości mechaniczne i fizyczne, z których najważniejsze są: mała gęstość, plastyczność, odporność na korozję, duża wytrzymałość na rozciąganie w podwyższonych temperaturach oraz duża wytrzymałość zmęczeniowa. Stopy tytanu stosowane są między innymi do produkcji silników lotniczych oraz struktur nośnych płatowców, co jest determinowane przez stosunek  $R_m/\rho$ , który dla stopu Ti6Al4V jest o 12% większy niż dla stopu aluminium 7075 i o kilkadziesiąt procent większy niż dla stali [1,2]. Biorąc pod uwagę konstrukcję silnika lotniczego stopy tytanu wykorzystywane są w kompresorach wysokiego i niskiego ciśnienia oraz są materiałem do wytwarzania części takich jak dyski i łopatki.

Szeroko stosowane we współczesnym procesie projektowania techniki wykorzystujące wspomaganie komputerowe (CAD – computer aided design) wymagają zastosowania wiarygodnych charakterystyk materiałowych. Różnorodność metod wytwarzania stopu

tytanu Ti6Al4V oraz jego anizotropowe właściwości powodują, że parametry mechaniczne materiału mogą zmieniać się w zależności od formy i procesu wytwórczego.

Celem prowadzonych badań była analiza właściwości mechanicznych blachy wykonanej ze stopu tytanu Ti6Al4V w warunkach quasi-statycznych i dynamicznych obciążeń rozciągających. W niniejszej pracy przedstawiono krzywe rozciągania stopu tytanu Ti6Al4V wyznaczone dla próbek wykonanych z blachy o grubości 1 mm walcowanej na zimno. Charakterystyki te zostały otrzymane dla szerokiego zakresu szybkości odkształcenia, od  $0,0001\text{s}^{-1}$  do  $300\text{ s}^{-1}$ . Proces deformacji plastycznej próbek oraz formowania przewężenia został prześledzony z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu oraz symulacji metodą elementów skończonych.

## **2. Opis stanowiska**

### **2.1. Próba rozciągania próbek Ti6Al4V w warunkach obciążeń dynamicznych**

Do badań w warunkach dużej szybkości odkształcania zastosowano metodę zmodyfikowanego pręta Hopkinsona [9,10], której schemat przedstawiono na rys. 1. Natomiast widok stanowiska, na którym przeprowadzono badania zaprezentowano na rys. 2. Metoda badania wykorzystuje wstępne naprężenie części pręta inicjującego. Badane płaskie próbki wykonane ze stopu tytanu Ti6Al4V o kształcie zaprezentowanym na rys. 4 były umieszczane pomiędzy dwoma prętami wykonanymi ze stopu aluminium 7075-T6. Pierwszy z prętów miał długość 3600 mm. Na jednym z końców pręt posiadał zaczep, do którego przymocowano siłownik hydrauliczny służący do wstępnego naprężenia pręta. W odległości 1600 mm od końca pręt posiada zgrubienie o długości 20 mm i średnicy 30 mm, na którym zaciskał się drugi siłownik służący do zablokowania pręta w trakcie wstępnego naprężania. Ustalając żadaną wartość wstępnego naprężenia można uzyskać przebieg fali inicjującej o określonej amplitudzie, a co za tym idzie żadaną szybkość odkształcenia oraz amplitudę przemieszczenia na końcu pręta. Po zwolnieniu sprzęgła rozpoczyna się proces propagacji fali elastycznej w prętach, który prowadzi do deformacji próbki. Przebieg fali inicjującej jest rejestrowany za pomocą tensometrów naklejonych radialnie w odległości 200 mm od zgrubienia na pręcie. Dzięki zastosowaniu dwóch symetrycznie naklejonych tensometrów możliwe jest zminimalizowanie efektów wybożenia prętów. Na drugim końcu pręta inicjującego wykonany jest gwintowany otwór, w który wkręca się uchwyt o wymaganym kształcie, który wynika z geometrii badanej próbki. Drugi pręt (transmisyjny) ma długość 1800 mm. Na jednym końcu jest wyposażony w identyczny uchwyt do mocowania próbek jak pręt inicjujący. Tensometr do pomiaru fali przechodzącej jest naklejony w odległości 200 mm od uchwytu. Sygnały z tensometrów są wzmacniane za pomocą mostka Vishay 2310, a następnie próbkowane i zapisywane przez oscyloskop cyfrowy.

Do zarejestrowania badania wykorzystano kamerę Phantom V1210. W zależności od rodzaju próbki zastosowano następujące parametry: rozdzielczość  $512 \times 112$ , częstotliwość wyświetlania klatek równa 150000 oraz, w celu uzyskania wyraźnych zdjęć bez zatarcia siatki pomiarowej wymaganej do analizy CKO, czas migawki został ustawiony na  $5,95\mu\text{s}$  dla próbki o długości roboczej 18mm. Odpowiednio dla próbki 30mm: rozdzielczość  $640 \times 112$ , częstotliwość wyświetlania klatek 120300 i czas migawki  $5,95\mu\text{s}$ . Bardzo krótki czas naświetlania wymaga użycia silnego źródła światła; w tym celu zastosowano dwa reflektory COOLH emitujące bardzo skupioną wiązkę światła.

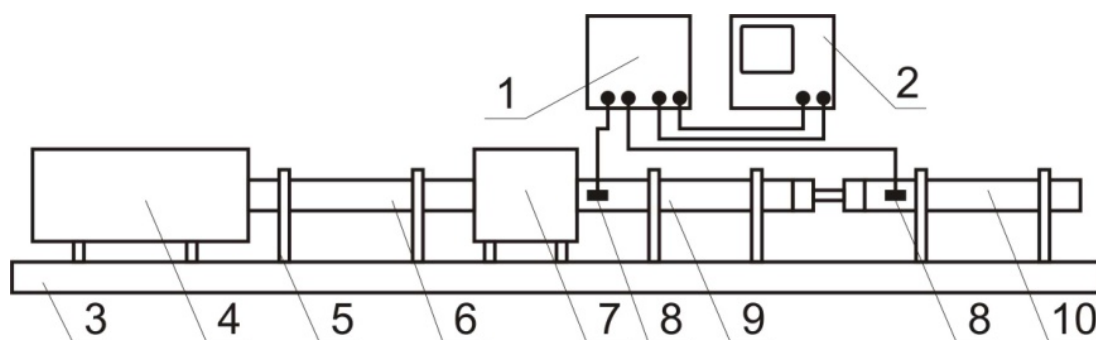
Na podstawie zarejestrowanych przebiegów fali przechodzącej  $\varepsilon_T(t)$  i odbitej  $\varepsilon_R(t)$ , wartości powierzchni przekroju poprzecznego prętów A i próbki  $A_s$ , prędkości

rozchodzenia się fali sprężystej w materiale prętów  $C_0$  oraz długości próbki  $L$ , można było wyznaczyć przebiegi czasowe naprężenia  $\sigma(t)$ , odkształcenia  $\varepsilon(t)$  i szybkości odkształcenia  $\dot{\varepsilon}(t)$  w próbce korzystając z zależności:

$$\delta(t) = E \left( \frac{A}{A_S} \right) \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R(t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = -\frac{2C}{L} \varepsilon_R(t) \quad (3)$$

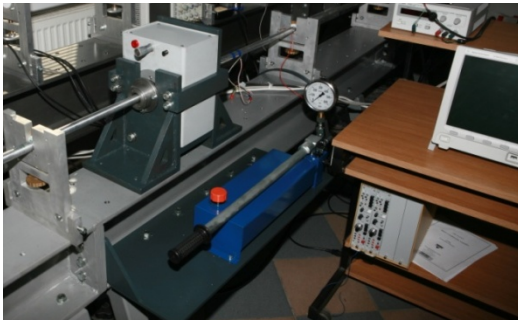


Rys.1. Schemat pręta Hopkinsona przeznaczonego do rozciągania próbek: 1 – mostek tensometryczny, 2 – oscyloskop cyfrowy, 3 – podstawa, 4 – siłownik hydrauliczny naciągu wstępnego, 5 – podpory, 6 – pręt inicjujący, 7 – sprzęgło hydrauliczne, 8 – tensometry, 9 – pręt inicjujący, 10 – pręt transmisyjny

Fig.1. Scheme of split tensile Hopkinson bar: 1 – wideband amplifier, 2 – digital oscilloscope, 3 – base, 4 – pressure tank, 5 – support, 6 – pre-tension section of incident bar, 7 – hydraulic clamp, 8 – strain gauges, 9 – free section of incident bar, 10 – transmitter bar



a)



b)



c)

Rys. 2. Pręt Hopkinsona przeznaczony do rozciągania próbek a), układ zamka b), hydrauliczny system naciągu wstępnego c)

*Fig. 2. Split Hopkinson tensile bar a); lock system b); hydraulic pressure tank c)*

## 2.2. Próba rozciągania próbek Ti6Al4V w warunkach obciążeń quasi-statycznych

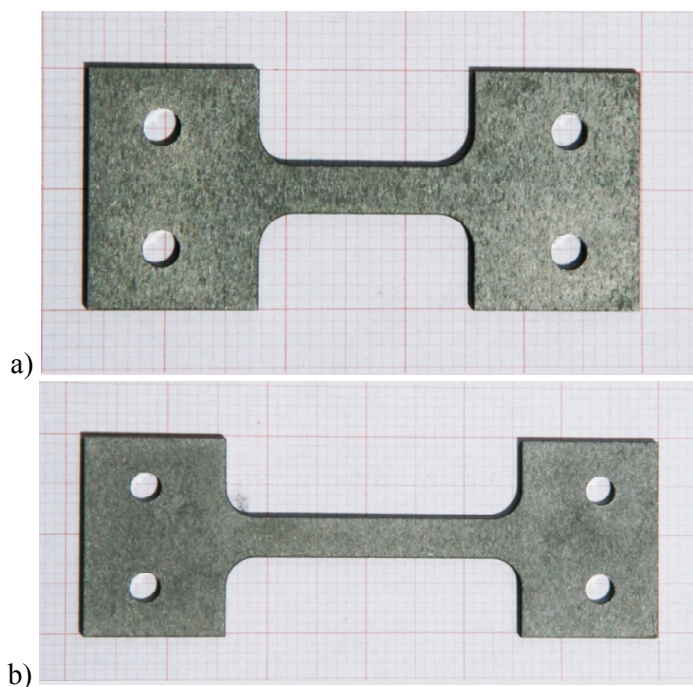
Do badań w zakresie statycznej szybkości odkształcenia zastosowano elektro-mechaniczną maszynę wytrzymałościową Instron ElectroPuls E10000. System pomiarowy ElectroPuls E10000 w układzie liniowym daje możliwość przeprowadzenia testów dynamicznych z obciążeniem do 10kN oraz testów statycznych z obciążeniem do 7kN. Podstawowym członem systemu jest bezszczotkowy elektryczny silnik liniowy. Siłownik wykorzystuje silne magnesy i siłę elektromagnetyczną do generowania obciążenia i przemieszczenia próbki. Skutkiem tego, ElectroPuls pozwala na utrzymanie wymaganych parametrów działania w trybie sterowania siłą, a także cyfrowego sterowania położeniem. Widok stanowiska, na którym przeprowadzono badania, zaprezentowano na rys. 3. Do przeprowadzenia badania wykorzystano takie same próbki, wykonane ze stopu Ti6Al4V, jak przy eksperymencie przeprowadzonym metodą pręta Hopkinsona (dane i wygląd przedstawiono w tabeli 2 oraz na rys. 5).

W celu zarejestrowania doświadczenia posłużono się systemem video ARAMIS 4M o rozdzielczości 2358x1728 pikseli. Nagrania video z eksperymentów zostały następnie przeanalizowane metodą DIC zrealizowaną przez środowisko systemu ARAMIS, w celu uzyskania powierzchni 2D odkształcenia.



Rys.3. Stanowisko pomiarowe Instron E10000

Fig.3. Testing machine Instron E10000



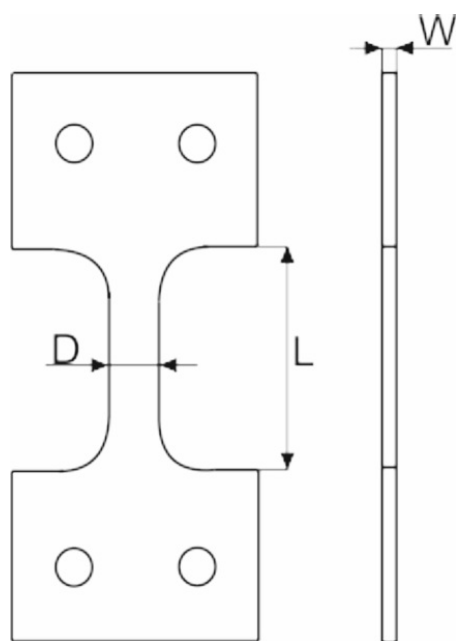
Rys. 4. Próbkę Ti6Al4V o długości roboczej: 18mm(a) i 30mm(b)  
 Fig. 4. Ti6Al4V specimen with gauge length equal to 18mm(a) and 30mm(b)

Wymiary wykorzystanych w badaniach próbek wykonanych ze stopu Ti6Al4V  
 Dimensions of the specimens made of Ti6Al4V titanium alloy used in the tests

Tabela 2

Table 2

<b>l.p.</b>	<b>Próba</b>	<b>L [mm]</b>	<b>W [mm]</b>	<b>D [mm]</b>
<b>18/2</b>	Dynamiczna	17,97	1,09	4,03
<b>18/3</b>	Dynamiczna	17,93	1,12	4,03
<b>18/4</b>	Dynamiczna	17,88	1,11	4,07
<b>30/19</b>	Dynamiczna	29,96	1,1	4,03
<b>30/20</b>	Dynamiczna	29,98	1,09	4,09
<b>30/21</b>	Dynamiczna	29,93	1,12	4,05
<b>18/6</b>	Statyczna	17,92	1,12	4,04
<b>18/7</b>	Statyczna	17,95	1,12	4,1
<b>18/8</b>	Statyczna	17,93	1,13	4,02
<b>18/9</b>	Statyczna	17,94	1,1	4,07
<b>18/10</b>	Statyczna	17,90	1,12	4,05
<b>30/22</b>	Statyczna	29,97	1,1	4,07
<b>30/23</b>	Statyczna	29,91	1,12	3,99
<b>30/24</b>	Statyczna	29,93	1,11	4,00
<b>30/25</b>	Statyczna	29,91	1,12	4,01
<b>30/26</b>	Statyczna	29,91	1,12	4,07
<b>30/27</b>	Statyczna	29,97	1,14	4,06



Rys. 5. Schemat próbki

Fig. 5. Specimen draft

### 2.3. Metoda cyfrowej korelacji obrazu

Metoda Cyfrowej Korelacji Obrazu (CKO) jest powszechnie znaną metodą pomiaru przemieszczenia, odkształcenia oraz zmiany kształtu badanych próbek. Od momentu powstania metoda CKO przeszła wiele zmian i udoskonaleń, dzięki którym pozwala na dostosowanie się do konkretnego problemu inżynierskiego [3,4].

Metoda bazuje na wykonaniu serii zdjęć przed i po obciążeniu badanego obiektu. Powierzchnia obiektu musi posiadać pewną losową teksturę (strukturę plamkową), która najczęściej zostaje naniesiona na badany obiekt w celu uzyskania dokładniejszych pomiarów. Jedno ze zdjęć w serii jest wybierane jako obraz referencyjny do wszystkich następných analiz. Obraz referencyjny jest dzielony na małe prostokątne regiony (tzw. subsety) zawierające  $N \times N$  pikseli. Wymiary każdego regionu mają związek z jakością i wielkością plamek struktury plamkowej. Program realizujący algorytm cyfrowej korelacji obrazu bada pozycję każdego subsetu z obrazu referencyjnego we wszystkich pozostałych obrazach serii pomiarowej. Algorytm ten polega na obliczaniu współczynnika korelacji wzajemnej oraz wektorów przemieszczeń, co umożliwia znalezienie danego subsetu w kolejnych obrazach w serii. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod interpolacji osiągnięta jest dokładność subpikselowa, tzn. większa od fizycznej rozdzielczości przetwornika. Wynikami analizy jest zbiór map przemieszczeń, które następnie mogą być wykorzystane do obliczeń map odkształcenia.

Wersja trójwymiarowa różni się tym, że dla każdego stanu mierzonego obiektu wykonuje się jednocześnie parę obrazów kamerami obserwującymi obiekt pod różnymi kątami. Metoda CKO, w połączeniu z metodami stereowizyjnymi i triangulacyjnymi, umożliwia wyznaczenie map przemieszczeń w płaszczyźnie i pozapłaszczyznowych.



## **2.4. Symulacja MES**

Metoda Elementów Skończonych (MES) jest metodą prowadzenia komputerowo wspomaganých obliczeń inżynierskich. W branżach przemysłowych służy ona do określenia oraz zweryfikowania właściwości danego produktu przed rozpoczęciem jego wytwarzania. Metoda MES w dzisiejszych czasach stwarza bardzo szeroką gamę możliwości obliczeniowych. Z jej pomocą możliwe jest badanie wytrzymałości konstrukcji, symulacja naprężenia, odkształcenia, przemieszczenia, przepływów (ciepła, cieczy), co więcej pozwala na badanie dynamiki, kinematyki i statyki maszyn i różnych rodzajów oddziaływań (elektrostatyczne, magnetostatyczne, elektromagnetyczne).

Metoda Elementów Skończonych [5,6] polega na dyskretyzacji układów geometrycznych ciągłych, czyli podziale danego obszaru na skończoną liczbę jego podobszarów. Dzięki temu możliwe jest modelowanie nawet bardzo złożonych konstrukcji poprzez ich prezentowanie za pomocą możliwie prostych geometrycznie elementów składowych. Co więcej, możliwe jest uwzględnienie nieciągłości oraz wielofazowości materiału, co w obliczeniach analitycznych stwarza zasadniczy problem.

Ideą MES jest podział modelu geometrycznego ciągłego na tzw. elementy skończone, łączące się w węzłach, co stanowi utworzenie modelu dyskretnego, czyli transformacji układu o nieskończonej liczbie stopni swobody na układ o skończonej jej liczbie. Warto dodać, że z zastosowaniem MES dyskretyzacji ulegają również wszystkie funkcje ciągle opisane na danym obszarze, które mogą zastępować wielkości fizyczne, tj. naprężenie czy przemieszczenie.

W celu uzyskania żądanych wyników za pomocą MES następnym krokiem jest określenie warunków brzegowych, działających wymuszeń oraz zbudowanie tzw. macierzy sztywności. Początkowo są to macierze lokalne, stworzone na podstawie wartości współrzędnych węzłów oraz wartości parametrów fizycznych elementów, a później macierz globalna (całego badanego przedmiotu) stworzona z macierzy lokalnych. Określając powyższe warunki można sformułować podstawowe macierzowe równanie MES, na którym opierają się wszystkie obliczenia:

$$M * \ddot{x} + C * \dot{x} + K * x = F \quad (4);$$

gdzie: M – macierz bezwładności,  
C – macierz tłumienia  
K – macierz sztywności,  
F – wektor sił uogólnionych,  
 $\ddot{x}$  - wektor przyspieszeń uogólnionych,  
 $\dot{x}$  – wektor prędkości uogólnionych,  
x – wektor przemieszczeń uogólnionych.

Mając na celu rozwiązanie danego zagadnienia mechaniki należy rozwiązać zbudowane uprzednio układy równań.

W dzisiejszych czasach programy CAE (CAE – Computer Aided Engineering) posługujące się metodą MES, bazują na trzech wzajemnie współpracujących modułach:

- preprocesor ( służy m.in. do importu lub przygotowania geometrii, doboru rodzaju elementów skończonych, dyskretyzacji obszaru oraz określenia warunków brzegowych);
- procesor ( tzw. Solver, służy do budowy oraz rozwiązywania układu równań, na podstawie którego uzyskuje się poszukiwane wartości danych wartości);
- postprocesor (moduł przeznaczony do prezentacji oraz analizy uzyskanych wyników).

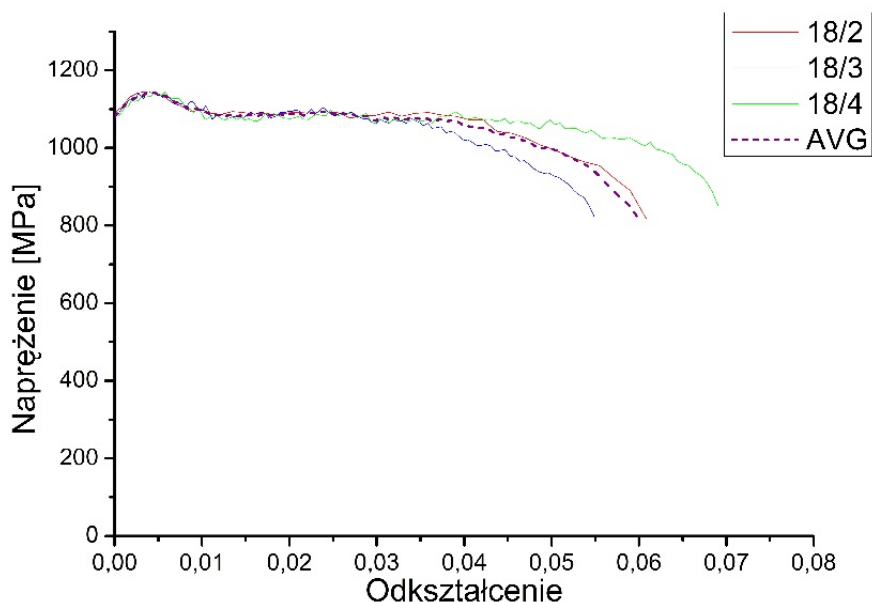
### 3. Przebieg badania i jego wyniki

#### 3.1. Próba rozciągania próbek Ti6Al4V w warunkach obciążeń dynamicznych

Podczas dynamicznej próby rozciągania wykorzystano 6 próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Trzy o długości części roboczej 18mm i trzy o długości części roboczej 30mm. Dokładne wymiary podano w tabeli 2.

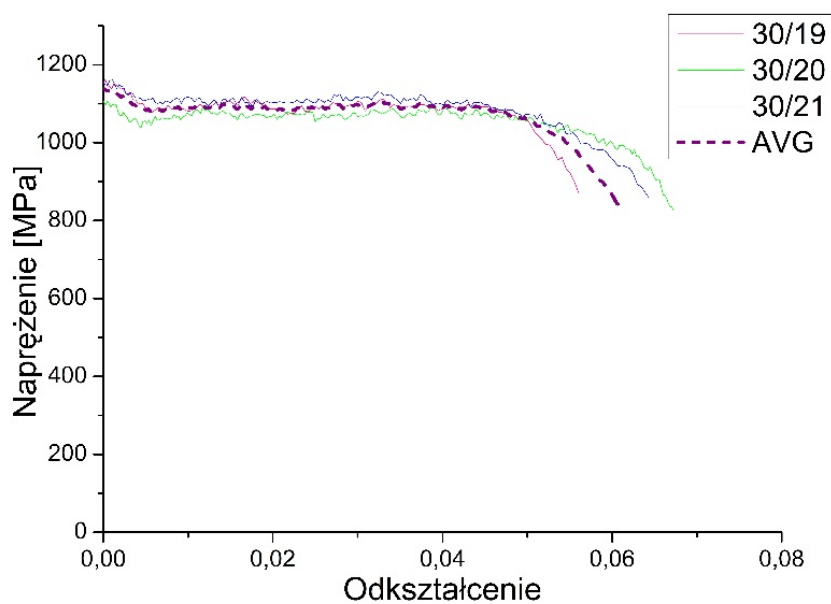
Dla każdej z sześciu prób zastosowano podobną siłę naciągu wstępnego, dzięki czemu otrzymano przebieg fali inicjującej o zbliżonej amplitudzie. Po zwolnieniu sprzęgła nastąpiła propagacja fali elastycznej, która doprowadziła do zerwania próbki, zgodnie z metodyką opisaną wcześniej. W wyniku eksperymentu otrzymano zależności naprężenie-odkształcenie dla badanych próbek (18/2-18/4, 30/19-30/21) przedstawione na rys. 6 i 7. Przebiegi zmian szybkości odkształcenia w trakcie testu zaprezentowano na rys. 8 i 9. Wykresy zostały sporządzone na podstawie danych zarejestrowanych przez oscyloskop cyfrowy oraz przetworzone za pomocą oprogramowania specjalnie opracowanego w środowisku LabView. Rysunki zawierają wyniki poszczególnych pomiarów oraz wartość średnią, oznaczoną jako AVG.

Do opracowania danych wykorzystane zostało również oprogramowanie ARAMIS 4M służące do optycznej analizy procesu deformacji plastycznej. W wyniku analizy otrzymano rozkłady 2D wartości odkształcenia na powierzchni próbki. Przedstawione dla próbek 18/2 i 30/21 odpowiednio na rys. 10 i rys. 11.



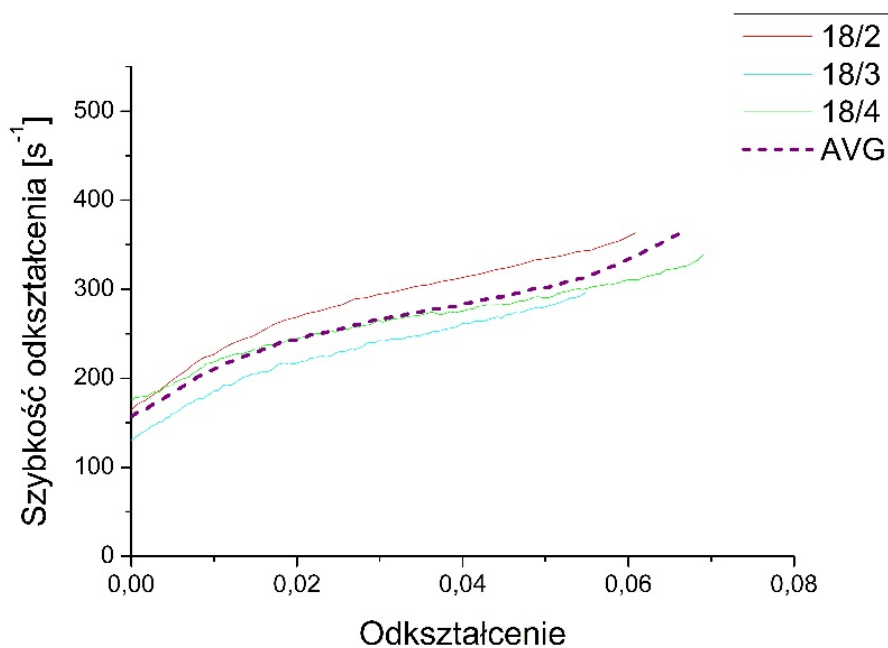
Rys. 6. Zależność naprężenie-odkształcenie dla próbek 18/2 – 18/4 wyznaczona w warunkach obciążeń dynamicznych

Fig. 6. Dynamic stress-strain curves of specimens 18/2 – 18/4



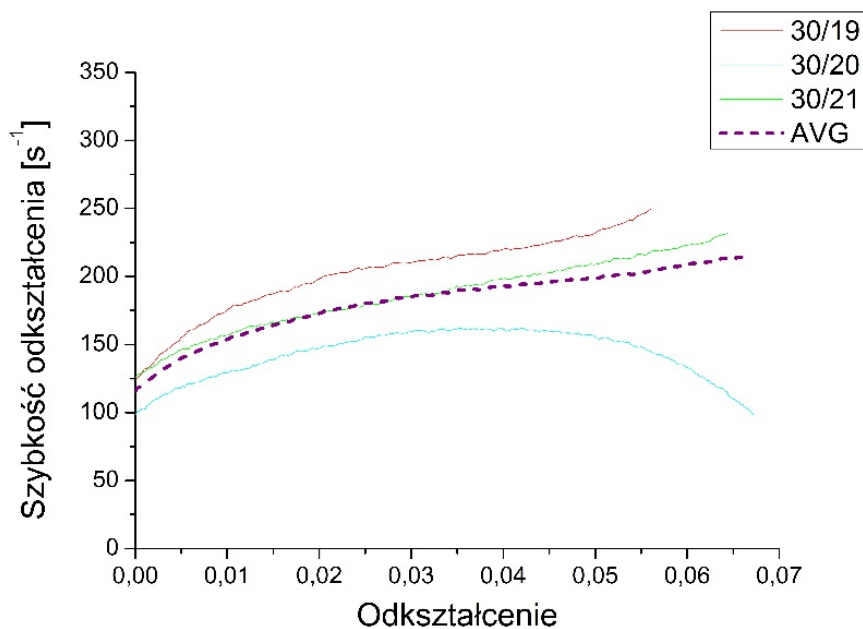
Rys. 7. Zależność napężenie-odkształcenie dla próbek 30/19 – 30/21 wyznaczona w warunkach obciążeń dynamicznych

Fig. 7. Dynamic stress-strain curves of specimens 30/19 – 30/21

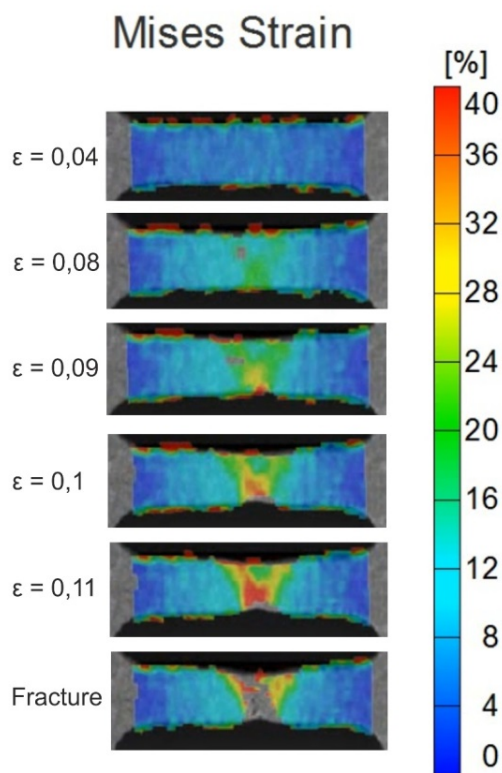


Rys. 8. Zmiana szybkości odkształcenia w próbkach 18/2 – 18/4

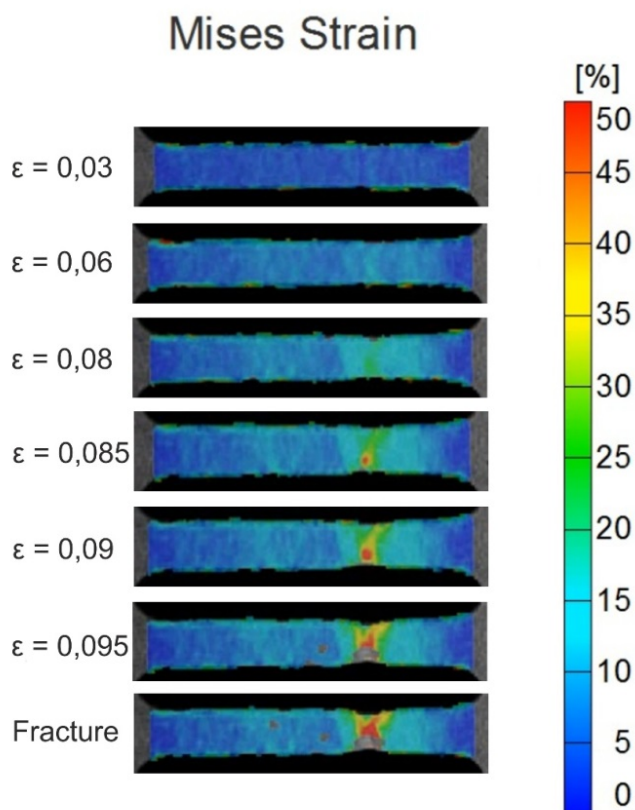
Fig. 8. Strain rate diagram of specimens 18/2 – 18/4



Rys. 9. Zmiana szybkości odkształcenia w próbkach 30/19 – 30/21  
 Fig. 9. Strain rate diagram of specimens 30/19 – 30/21



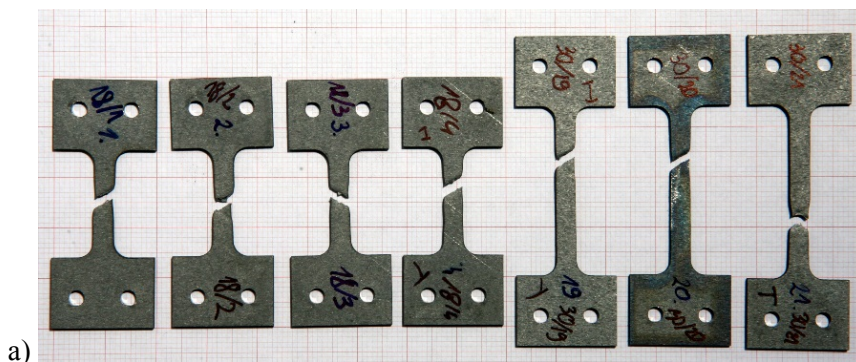
Rys. 10. Rozkład 2D wartości odkształcenia Hubera-Misesa dla próbki 18/2  
 Fig. 10. Huber-Mises strain during dynamic tensile test of specimen 18/2



Rys. 11. Rozkład 2D wartości odkształcenia dla próbki 30/21  
Fig. 11. Huber-Mises strain during dynamic tensile test of specimen 30/21

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i analizy danych uzyskanych na podstawie połowych pomiarów odkształceń można stwierdzić, że dla próbek 18mm wartości poszczególnych parametrów mechanicznych bezpośrednio przed zerwaniem były następujące: odkształcenie lokalne wyznaczone metodą CKO równe około 0.50, przy odkształceniu makroskopowym wyznaczonym z użyciem teorii propagacji fal sprężystych w prętach wynoszącym około 0.11. Analogicznie, dla próbek o długości części roboczej 30mm wartość lokalnego odkształcenia wynosiła około 0.60, przy odkształceniu makroskopowym równym 0.09. Można zauważyć również, że dla krótszych próbek szybkość odkształcenia była większa o  $50-100s^{-1}$ , co wynika z różnicy długości próbek, przy tej samej szybkości przemieszczania uchwytów w prętach roboczych.

Widok próbek wykonanych ze stopu Ti6Al4V po zakończeniu badań przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Próbkki Ti6Al4V po próbie rozciągania w warunkach obciążeń dynamicznych  
*Fig. 12. Ti6Al4V specimens after dynamic tensile test*

### 3.2. Próba rozciągania próbek Ti6Al4V w warunkach obciążeń statycznych

W trakcie eksperymentu wykorzystanych zostało 11 próbek stopu tytanu: 5 próbek o długości roboczej 18mm oraz 6 o długości roboczej 30mm. Próbkki zostały poddane jednoosiowemu rozciąganiu z użyciem maszyny wytrzymałościowej Instron E10000. Wartości szybkości odkształcenia występujących w eksperymencie zostały przedstawione w tabeli 3. W celu uzyskania lepszej jakości rejestrowanego obrazu potrzebnej przy analizie metodą CKO w programie ARAMIS, próbki: 18/6, 18/7, 30/22, 30/23, 30/24 zostały pokryte farbą Opaque Golden Airbrush Colors w kolejności: Carbon Black, Titanium White. Pozostałe próbki nie zostały poddane analizie korelacyjnej.

Na podstawie danych eksperymentalnych, otrzymanych z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej, opracowano zależności naprężenie-odkształcenie dla wszystkich próbek, co zostało przedstawione na rys. 15 i 16. Za pomocą oprogramowania ARAMIS stworzono mapy prezentujące rozkład wartości odkształcenia na powierzchni próbek. Rozkład naprężeń został zaprezentowany dla próbek 18/6 i 30/24, odpowiednio na rys. 13 i 14, natomiast wygląd próbek po zerwaniu przedstawiono na rys. 17.

Na podstawie wyników statycznej próby rozciągania próbki o długości części roboczej wynoszącej 18 mm oraz analizy metodą CKO można zaobserwować, że lokalne odkształcenie (wyznaczone z użyciem CKO) bezpośrednio przed zerwaniem dla próbki 18/6 (szybkość odkształcenia  $0,0001s^{-1}$ ) jest równe 0.85, przy odkształceniu makroskopowym (wyznaczonym na podstawie danych z ekstensometru) wynoszącym 0.17. Podobna analiza dla próbki o długości części roboczej równej 30mm (szybkość odkształcenia  $0.01s^{-1}$ ) wykazała, że odkształcenie lokalne wynosi 0.25 przy wartości odkształcenia makroskopowego równej 0,10. Stwierdzono, że dla próbki 18/6 można dostrzec wyraźnie powstające przewężenie, które natomiast nie jest widoczne dla próbki 30/24. Stop tytanu charakteryzuje wyraźnie obserwowalną wrażliwością na szybkość odkształcenia. Granica plastyczności wyznaczona dla szybkości odkształcenia  $0,0001 s^{-1}$  wynosi ok. 1080MPa, ze wzrostem szybkości odkształcenia do  $0,01 s^{-1}$  materiał umacnia się, czego efektem jest wzrost granicy plastyczności do ok 1150 MPa. Dalszy wzrost szybkości odkształcenia do wartości rzędu  $150-300 s^{-1}$  nie powoduje zauważalnego umocnienia materiału. Tego typu zachowanie może być tłumaczone efektem dynamicznego odkształcenia starzeniowego [13]. Ze wzrostem szybkości odkształcenia można także zaobserwować wyraźne zmniejszenie wartości odkształcenia przy zerwaniu próbek.

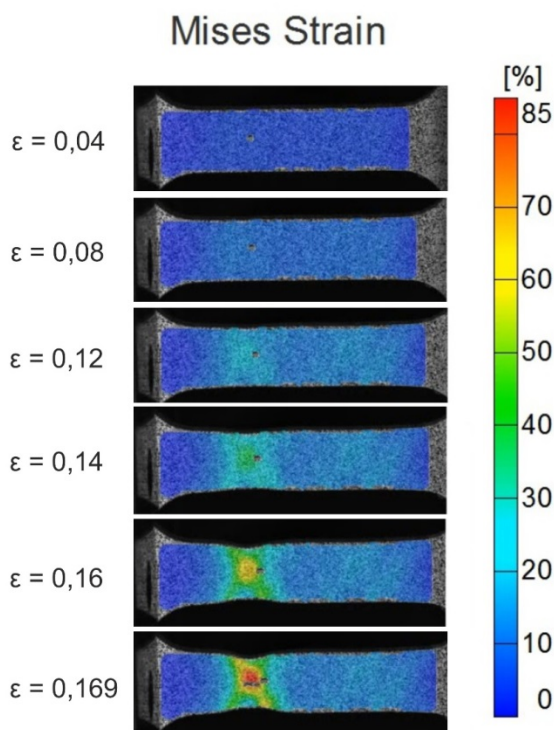
Wartości szybkości odkształcenia dla próbek rozciąganych na maszynie wytrzymałościowej Instron E10000

Tabela 3

Strain rate values of specimens stretched on testing machine Instron E10000

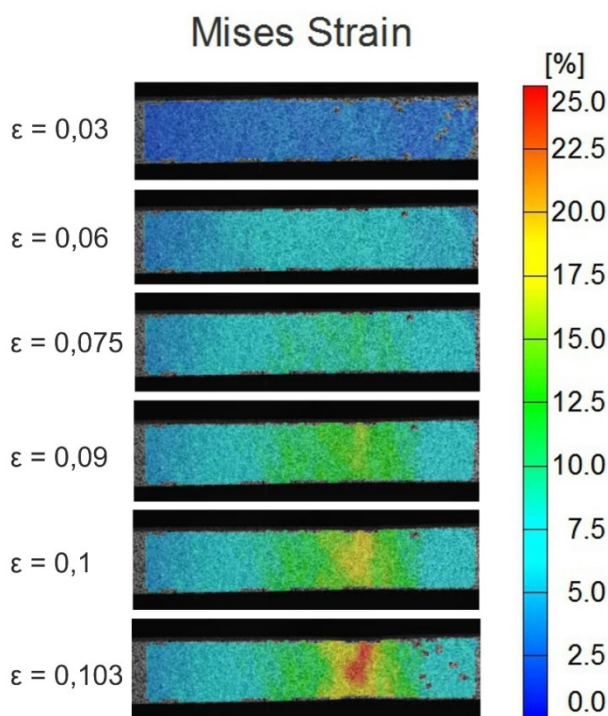
Table 3

l.p.	Szybkość odkształcenia [s <sup>-1</sup> ]
18/6	0,0001
18/7	0,01
18/8	0,0001
18/9	0,0001
18/10	0,0001
30/22	0,01
30/23	0,01
30/24	0,01
30/25	0,0001
30/26	0,0001
30/27	0,0001

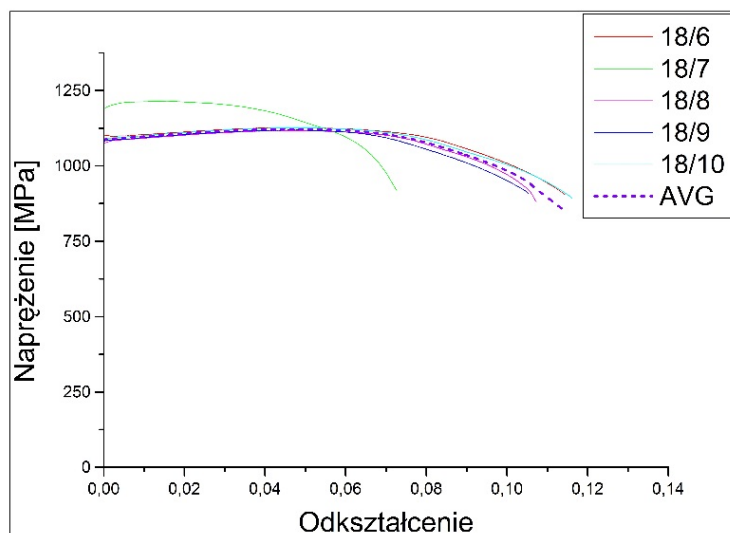


Rys. 13. Rozkład 2D wartości odkształcenia Hubera-Misesa dla próbki 18/6

Fig. 13. Huber-Mises strain during static tensile test of specimen 18/6



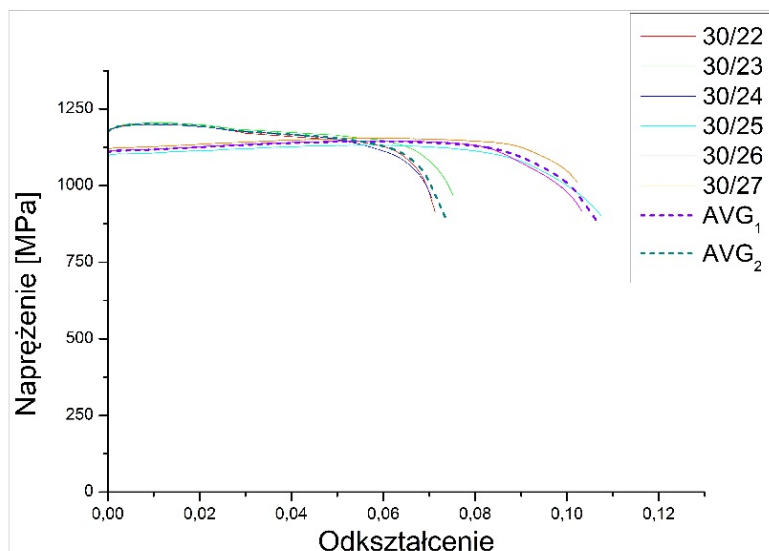
Rys. 14. Rozkład 2D wartości odkształcenia Hubera-Misesa dla próbki 30/24  
 Fig. 14. Huber-Mises strain during static tensile test of specimen 30/24



Rys. 15. Zależność napężenie-odkształcenie wyznaczona w próbach statycznego rozciągania próbek o długości 18 mm, otrzymane na podstawie danych zarejestrowanych przy pomocy maszyny wytrzymałościowej Instron E10000

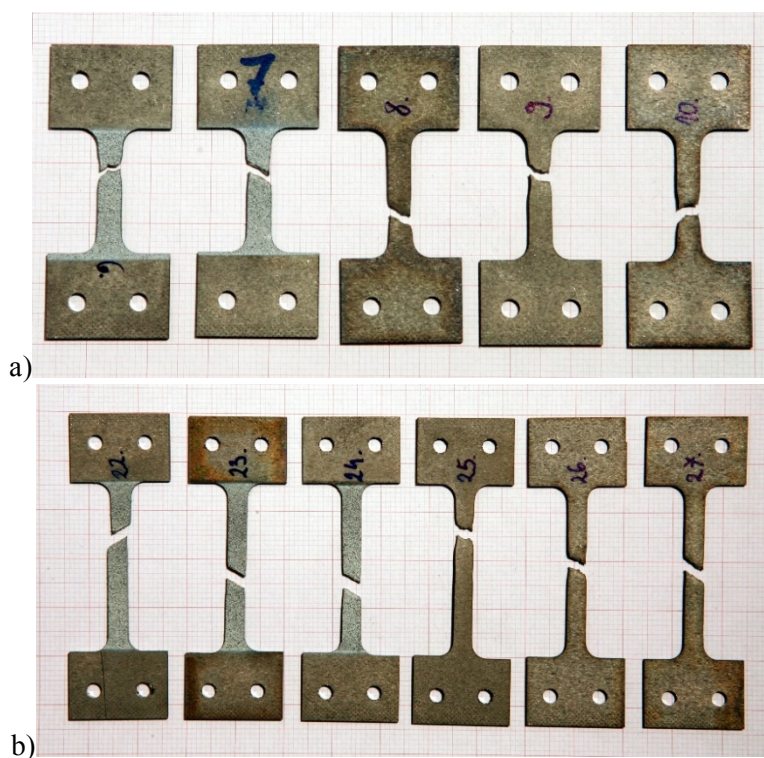
Fig. 15. Static tensile curves of the specimens with gauge length equal to 18 mm determined on the basis of data recorded by testing machine Instron E10000





Rys. 16. Zależność napężenie-odkształcenie wyznaczona w próbach statycznego rozciągania próbek o długości 30 mm, otrzymane na podstawie danych zarejestrowanych przy pomocy maszyny wytrzymałościowej Instron E10000

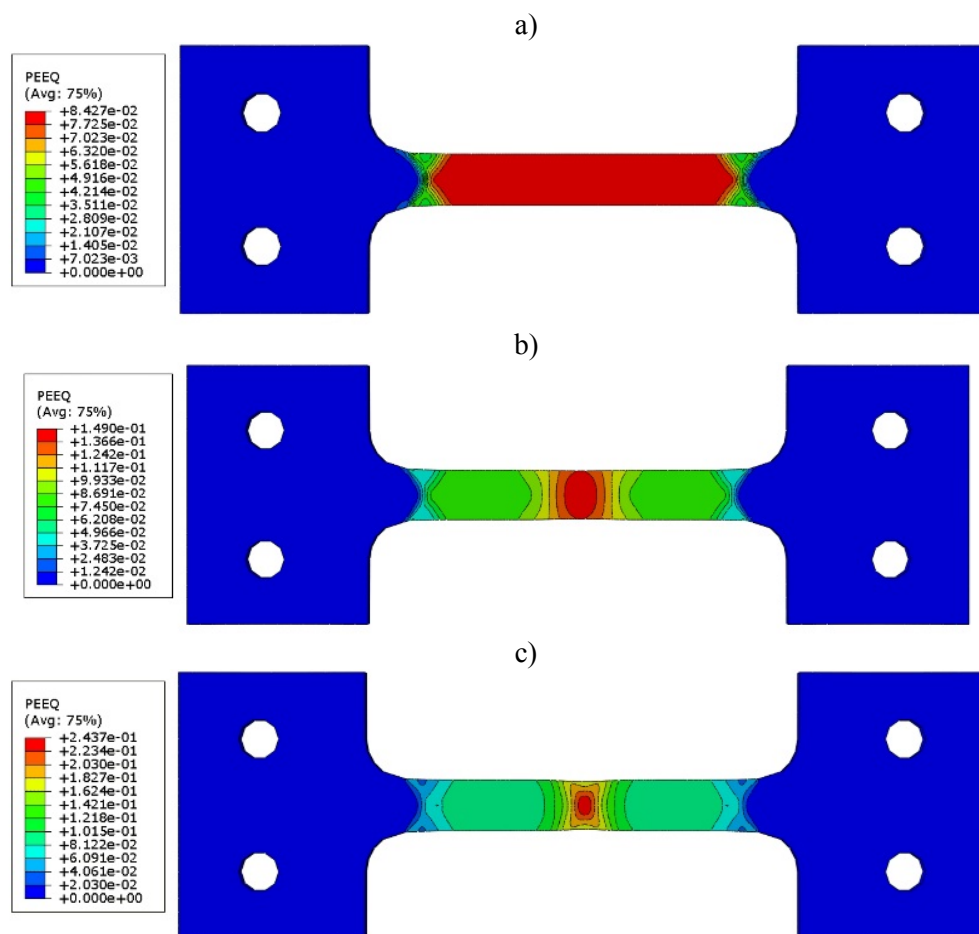
Fig. 16. Static tensile curves of the specimens with gauge length equal to 30 mm determined on the basis of data recorded by testing machine Instron E10000



Rys. 17. Próbkki Ti6Al4V po próbie statycznego rozciągania: a) część robocza 18 mm, b) część robocza 30 mm

Fig. 17. Ti6Al4V specimens after static tensile test: a) gauge length equal to 18 mm, b) gauge length equal to 30 mm

## 3.3. Analiza MES rozciągania



**Rys. 18.** Wizualizacja 2D wartości odkształcenia (zmienna PEEQ) otrzymana za pomocą programu ABAQUS/Standard: a)  $\epsilon=0.09$ ; b)  $\epsilon=0.10$ ; c)  $\epsilon=0.105$

**Fig. 18.** 2D visualization of strain distribution (PEEQ variable) carried out using ABAQUS/Standard: a)  $\epsilon=0.09$ ; b)  $\epsilon=0.10$ ; c)  $\epsilon=0.105$

Uzyskane w quasi-statycznym zakresie odkształcania krzywe zostały wykorzystane do przeprowadzenia analizy procesu deformacji plastycznej próbek z wykorzystaniem MES w programie ABAQUS/Standard. Przedmiotem analizy była próbka o długości części roboczej 30 mm. W celu analizy model próbki został podzielony na 6482 elementy skończone (typ elementu: C3D8R). Jeden koniec próbki został utwierdzony, natomiast do drugiego końca przyłożono przemieszczenie jednoosiowe o wartości maksymalnej 4mm. Wartość przemieszczenia rosła liniowo wraz z czasem symulacji. Wyniki obliczeń w postaci wizualizacji 2D wartości odkształcenia (PEEQ) przedstawiono na rys. 18.

Porównując wyniki otrzymane za pomocą metody CKO oraz analizy MES można zauważyć, że w obu przypadkach zerwanie próbki jest poprzedzone powstawaniem przewężenia w obszarze zbliżonym do miejsca zerwania. Makroskopowo wyznaczona na podstawie obliczeń wartość odkształcenia potrzebnego do zerwania próbki wynosi 0.105. Jest ona zbliżona do wartości otrzymanej eksperymentalnie.

#### **4. Podsumowanie**

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i analiz stwierdzono, że:

- Stop tytanu Ti6Al4V wykonany w postaci blachy walcowanej o grubości 1mm przejawia efekt dynamicznego odkształcenia starzeniowego [13]. W wyniku tego wzrost granicy plastyczności jest obserwowany tylko w zakresie szybkości odkształcenia od  $0,0001s^{-1}$  do  $0,01s^{-1}$ . Dalszy wzrost szybkości odkształcenia nie powoduje wyraźnie obserwowalnego umocnienia materiału.
- Ze wzrostem szybkości odkształcenia można zaobserwować wyraźny spadek wartości odkształcenia zmierzonej w momencie zerwania próbki. Efekt ten jest widoczny także przy statycznej szybkości odkształcenia, w związku z tym nie jest związany z adiabatycznym nagrzewaniem występującym w trakcie testów dynamicznych.
- W warunkach obciążeń dynamicznych efekty niestabilności plastycznego płynięcia, obserwowane jako powstawanie przewężenia, można zaobserwować, na podstawie analizy CKO, przy makroskopowym odkształceniu wynoszącym 0.08. Natomiast w warunkach statycznych przewężenie zaczyna się kształtować przy odkształceniu równym 0.075 oraz 0.12 odpowiednio dla szybkości odkształcenia  $0,01s^{-1}$  oraz  $0,0001s^{-1}$ .

#### **LITERATURA:**

- [1] Laskowski P., Habrat W., Krupa K., Sieniawski J., Toczenie wykończeniowe stopu tytanu Ti-6Al-4V z zastosowaniem HPC, STAL Metale & Nowe Technologie, 11-12/2013, ss. 56-62.
- [2] Melechow R, Tubielewicz K, Błaszczuk W. Tytan i jego stopy, Częstochowa Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, 2004
- [3] Malesa\* M., Kujawińska M., Malowany K., Lusa T., Application of multi-camera DIC system for measurements of industrial structures, Procedia Engineering, 114/2015, ss. 453 – 460.
- [4] Ramos T., Furtado A., Eslami S., Alves S., Rodrigues H., Arêde A., Tavares P.J., Moreira P. M. G. P., 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering – Measurements in a Masonry Wall, Procedia Engineering, 114/2015, ss. 215 – 222,.
- [5] Dacko M, Borkowski W., Dobrociński S, Niezgodna T., Wieczorek M.: Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji, Arkady, Warszawa 1994
- [6] Rakowski G., Kacprzyk Z.: MES w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [7] Krishnakumar\* P., Rameshkumar K., Ramachandran K.I., Tool Wear Condition Prediction Using Vibration Signals in High Speed Machining (HSM) of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy, Procedia Computer Science, 50, 270 – 275, 2015.
- [8] Xiao-Long Gao, Lin-JieZhang\*, JingLiu, Jian-XunZhang, A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate, Materials Science & Engineering A, 559/2013, ss. 14–21.
- [9] Zhao H., Material behaviour characterisation using SHPB techniques, tests and simulations, Computers and Structures, 81/2003, ss. 1301–1310.
- [10] Lee\* O.S., Kim M.S., Dynamic material property characterization by using split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique, Nuclear Engineering and Design, 226/2003, ss. 119–125,.
- [11] Magdalena Biel: Mikrostruktura i właściwości biomateriałów tytanowych po obróbce powierzchniowej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków 2006.
- [12] Moćko W., Wpływ szybkości oraz temperatury odkształcania na lepko-plastyczne właściwości tytanu oraz stopu TiAl6V4, Transport Samochodowy 3/2014, ss. 65-75.

- [13] Rizzi E., Hahner P., On the Portvein-Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results, *Int. J. of Plasticity*, 20/2002, ss. 161-165.